

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Studie možnosti snížení přídatných ztrát  
v asynchronním motoru**  
**Possibilities of Decreasing of Additional Power Losses in  
Asynchronous Motor**

**2017**

**Bc. Jan Hrabčík**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Hrabčík**  
Studijní program: **N2649 Elektrotechnika**  
Studijní obor: **3907T001 Elektroenergetika**  
Téma: **Studie možnosti snížení přídatných ztrát v asynchronním motoru**  
**Possibilities of Decreasing of Additional Power Losses in Asynchronous Motor**  
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor (konstrukce as. motoru, rozbor přídatných ztrát)
3. Vytvořte FEM model asynchronního motoru
4. Proveďte simulaci pro výpočet přídatných ztrát as. motoru
5. Zhodnocení analýzy a diskuze nad výsledky simulace
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- MENTLÍK, Václav, et al. Diagnostika elektrických zařízení, 2008, Praha, BEN
- KOPYLOV, Igor, Petrovič. Stavba elektrických strojů, 1988, Praha, SNTL/MIR
- CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
- KAČOR, Petr. Vybrané typy elektrických strojů, Ostrava, 2010, VŠB-TU Ostrava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28. 4. 2017

  
.....

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. a panu Mgr. Ing. Pavlu Tošenovjanovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Předkládaná práce obsahuje nejprve teoretický rozbor ztrát v asynchronním motoru s kladením většího důrazu na přídavné ztráty. Zahrnuje také přístupy k určování přídavných ztrát podle IEC 60034-2-1, podle IEEE std112 a vzájemné porovnání těchto dvou norem. Práce je dále doplněna o výpočty účinnosti stroje, především přídavných ztrát, na základě změny různých parametrů stroje.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor, účinnost, ztráty, přídavné ztráty, IEC 60034-2-1, IEEE std112, výpočet ztrát.

## **Abstract**

The presented thesis includes first the theoretical analysis of induction motor losses with placing more emphasis on additional losses. It also includes approaches to determine additional losses according to standard IEC 60034-2-1, IEEE std112 and the mutual comparison of these two standards. The thesis is completed by machine efficiency calculations, particularly additional losses, based on changes in the various machine parameters.

## **Keywords**

Induction motor, efficiency, losses, additional losses, IEC 60034-2-1, IEEE std112, calculating losses.

# Obsah

Seznam použitých symbolů .....	8
Seznam použitých obrázků .....	9
Seznam tabulek .....	9
Úvod .....	10
1 Asynchronní motor s kotvou nakrátko .....	11
1.1 Konstrukční prvky asynchronního motoru s kotvou nakrátko .....	11
1.2 Princip funkce asynchronního motoru s kotvou nakrátko .....	11
2 Účinnost a ztráty v asynchronním stroji .....	12
2.1 Ztráty v asynchronním stroji .....	12
2.2 Třídy účinnosti podle IEC 60034- 30-1 .....	13
3 Druhy ztrát v asynchronním stroji s kotvou nakrátko .....	15
3.1 Mechanické ztráty .....	15
3.1.1 Ztráty třením .....	15
3.1.2 Ztráty ventilační .....	16
3.2 Ztráty elektrické .....	16
3.3 Ztráty v železe .....	17
3.3.1 Ztráty hysterezní .....	17
3.3.2 Ztráty vířivými proudy .....	18
3.4 Přídavné ztráty .....	19
3.4.1 Povrchové ztráty naprázdno .....	19
3.4.2 Pulzační ztráty naprázdno .....	22
3.4.3 Přídavné ztráty klecové kotvy naprázdno .....	24
3.4.4 Přídavné ztráty klecové kotvy na prázdnou při zešikmení .....	24
3.4.5 Přídavné ztráty při zatížení .....	28
3.4.6 Vliv zešikmení drážek na přídavné ztráty při zatížení .....	29
4 Metody určování přídavných ztrát .....	35
4.1 Točení proti poli podle p. Hellera a Hamaty .....	35
4.2 Určování přídavných ztrát podle normy IEC 60034-2-1 .....	35
4.2.1 Součet ztrát- zbytková metoda .....	35
4.2.2 Součet ztrát- přiřazená hodnota pro přídavné ztráty .....	37
4.2.3 Součtová metoda- součet ztrát za použití metod točení proti poli a měření bez rotoru .....	38

4.2.4	Měření přídavných ztrát pomocí Eh-star testu .....	39
4.2.5	Stanovení účinnosti za použití náhradních parametrů .....	41
4.3	Určování přídavných ztrát podle IEEE std 112.....	44
4.3.1	Nepřímá metoda .....	44
4.3.2	Přímá metoda .....	44
4.3.2.1	Přídavné ztráty při základní frekvenci. ....	44
4.3.2.2	Vysokofrekvenční přídavné ztráty.....	44
4.3.2.3	Výpočet přídavných ztrát .....	45
4.3.2.4	Vyhlazení testovaných hodnot.....	45
4.3.3	Alternativní metoda pro motory s vinutým rotorem.....	45
4.3.4	Metoda přiřazení hodnoty .....	46
4.3.5	Vstup-výstup s rozdělením ztrát (B).....	46
4.3.6	Duplicitní metoda (C) .....	47
4.3.7	Měření výkonu s rozdělením ztrát (E a E1) .....	48
4.3.8	Měření účinnosti pomocí náhradního schématu motoru (F a F1).....	48
4.3.9	Měření účinnosti pomocí náhradního schématu motoru kalibrovaného pro jeden bod zatížení (C/F, E/F, E1/F1).....	49
4.4	Porovnání IEEE 112 a IEC 60034-2-1 .....	49
5	Návrhy pro snížení přídavných ztrát.....	51
5.1	Parametry vybraného vzorku asynchronního motoru.....	51
5.2	Vytvoření 2D modelu v programu ANSYS Maxwell .....	52
5.3	Vliv poměru drážek rotoru a statoru na přídavné ztráty .....	54
5.4	Vliv otevření statorové drážky a vzduchové mezery na přídavné ztráty .....	56
5.5	Další parametry ovlivňující přídavné ztráty .....	58
5.6	Závěrečné zhodnocení .....	59
	Závěr.....	61
	Seznam použité literatury .....	63



## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\eta$	%	Účinnost
$2p$	-	Počet pólpárů
$B$	T	Mag. indukce
$\cos\varphi$	-	Účíník
$D_e$	mm	Průměr stroje
$f$	Hz	frekvence
$F$	N	Síla
$H$	$A \cdot m^{-1}$	Intenzita mag. pole
$I$	A	Proud
$l$	mm	Délka stroje
$M$	N.m	Moment
$n$	ot/min	Otáčky
$\varphi$	mm	Velikost vzduch. mezery
$P$	W	Výkon
$R$	$\Omega$	El. odpor
$s$	-	Skluz
$S$	$mm^2$	Průřez
$t$	s	Čas
$U$	V	El. napětí
$Z$	$\Omega$	Impedance
$v$	m/s	Rychlost
$\rho$	$\Omega \cdot m$	Rezistivita
$\phi$	Wb	Magnetický tok
$\omega$	m/s	Úhlová rychlost

## Seznam použitých obrázků

Obrázek 1.1: Rozložený motor s kotvou nakrátko .....	11
Obrázek 2.1: Procentuální rozdělení ztrát v AM .....	12
Obrázek 2.2: Tok výkonu asynchronním motorem .....	13
Obrázek 2.3: Účinnost v závislosti na výkonu motoru podle tříd účinnosti. ....	14
Obrázek 3.1: Statická hysterezní smyčka.....	18
Obrázek 3.2: Průběh přidavného pole.....	19
Obrázek 3.3: Průběh magnetického pole k výpočtu povrchových ztrát.....	20
Obrázek 3.4: Průběh magnetické indukce v závislosti na poloze zubů statoru a rotoru ..	22
Obrázek 3.5: Rozvinutý povrch rotoru .....	25
Obrázek 3.6: Poměry pro $n$ a $(n+1)$ .....	26
Obrázek 3.7: Vektorový diagram proudů v rotoru .....	27
Obrázek 3.8: K výpočtu přidavných ztrát vlivem příčných proudů .....	30
Obrázek 3.9: K výpočtu přidavných ztrát vlivem příčných proudů .....	31
Obrázek 3.10: Průběhy gradientů napětí.....	31
Obrázek 3.11: Průběhy gradientů napětí.....	32
Obrázek 3.12: K výpočtu přidavných ztrát vlivem zešíkmení .....	33
Obrázek 4.1: Závislost přidavných ztrát na druhé mocnině momentu .....	36
Obrázek 4.2: Odvození přidavných ztrát při zatížení .....	37
Obrázek 4.3: Zapojení pro měření metodou Eh-star test .....	40
Obrázek 4.4: Náhradní schéma asynchronního motoru .....	41
Obrázek 4.5: Zjednodušené náhradní schéma pro výpočty.....	43
Obrázek 5.1: Rozměrový náčrtek rotorové (vlevo) a statorové (vpravo) drážky .....	51
Obrázek 5.2: 2D model zkoumaného motoru .....	53
Obrázek 5.3: Magnetické sycení v zubech.....	53
Obrázek 5.4: Porovnání vlivu změn parametrů stroje na účinnost a přidavné ztráty .....	59

## Seznam tabulek

Tabulka 4-1: Přiřazená hodnota přidavných ztrát.....	46
Tabulka 5-1: Štítkové hodnoty vybraného vzorku motoru .....	51
Tabulka 5-2: Vstupní data .....	52
Tabulka 5-3: Porovnání ztrát zjištěných různým způsobem .....	54
Tabulka 5-4: Možnosti kombinací drážek rotoru a statoru v případě rovných drážek ...	55
Tabulka 5-5: Porovnání veličin ovlivněných změnou počtu drážek rotoru .....	56
Tabulka 5-6: Vliv vzduchové mezery a otevření statorové drážky na parametry stroje ..	57
Tabulka 5-7: Přiřazení hodnot sloupců v tabulce 5-6 .....	57
Tabulka 5-8: Změny ovlivňující parametry stroje .....	58
Tabulka 5-9: Přiřazení hodnot sloupcům v tabulce 5-8 .....	58

# Úvod

V poslední době se stále více dbá na dopad průmyslu na životní prostředí. Asynchronní motory sice přímo životní prostředí neznečišťují, ale jejich provoz je úzce spojen s potřebou výroby elektrické energie a tím i vzniku škodlivého plynu  $\text{CO}_2$ . Proto je kladen vysoký nárok na zlepšení účinnosti motorů. V EU se za rok spotřebuje přibližně 3100 TWh elektrické energie, z čehož 30% spotřebují právě motory. Vezmeme-li v úvahu, že by všechny motory pracovaly s účinností o 1% vyšší, znamenalo by to, že se za rok ušetří 9,6 TWh elektrické energie, což by mělo za následek, že se nemusí provozovat více, než jedna tepelná elektrárna, jako například Chvaletice (800MW). Mimo ekologické dopady má účinnost vliv i na ekonomiku, kdy při stejném výkonu motor s horší účinností odebere ze sítě více elektrické energie, než motor s lepší účinností. To se projeví na celkovém množství odebrané elektrické energie a tím i na platbě za ni.

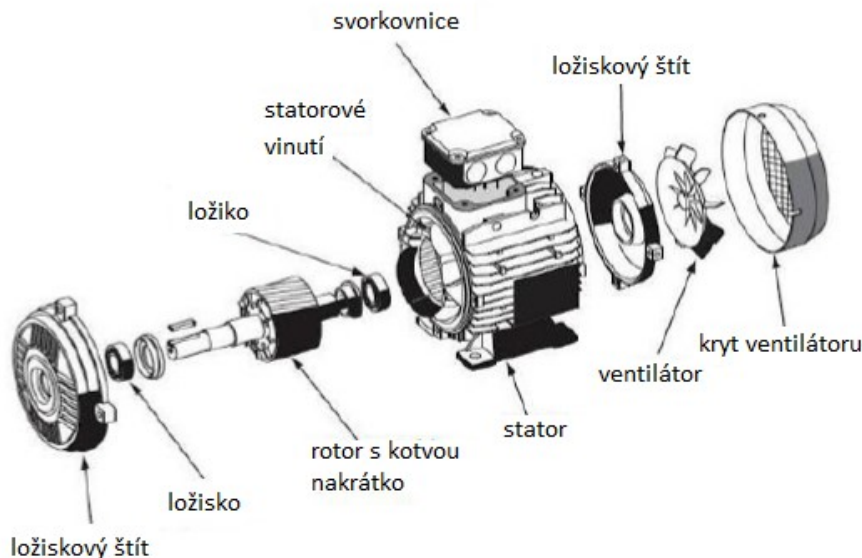
Cílem mé práce je nastudovat a matematicky prokázat možnosti zvýšení účinnosti konkrétního motoru, Siemens 1LE1 543-3AB53-4AB0 o výkonu 200 kW, na základě navržení možností snížení přídatných ztrát. Přídatné ztráty se skládají ze ztrát povrchových, pulzačních a ztrát klecové kotvy. Ve většině dostupné literatury se přídatné ztráty uvádí pouze jako zbytkové ztráty po odečtení ostatních ztrát od rozdílu příkonu a výkonu, nebo se počítají jako procentuální podíl výkonu stroje. Ačkoli jsou přídatné ztráty malé, většinou do 1,5% je třeba s nimi počítat, protože u velkých strojů to může znamenat i několik kW. Tyto ztráty jsou ovlivňovány počtem drážek statoru a rotoru, velikostí vzduchové mezery a počtem pólpárů. V neposlední řadě má vliv na přídatné povrchové ztráty konstrukce stroje, tedy zda-li je rotor či stator vyroben jako odlitek nebo skládaný z plechů. Určit přídatné ztráty je velice obtížné, neboť jsou těžko změřitelné a navíc s poměrně velkou nepřesností. Zatím známý nejpřesnější a v podstatě jediný způsob jak přídatné ztráty určit matematicky je výpočet na základě vztahů ověřených praxí, uvedených dále v práci.

Práce je rozdělená celkově do pěti základních kapitol. V první a druhé kapitole je stručně popsán princip funkce asynchronního motoru, rozdělení ztrát v motoru a popis tříd účinnosti podle IEC 60034-30-1. Třetí kapitola popisuje vznik jednotlivých ztrát v motoru s podrobnějším rozbořením přídatných ztrát. Následně jsou probírány způsoby zjišťování přídatných ztrát s porovnáním přístupů IEC 60034-2-1 a IEEE std112. V poslední kapitole je nejprve porovnání 2D modelu, výpočtů v programu SIMOCALC a protokolu z certifikované zkušebny se štítkovými hodnotami sériově vyráběného motoru 1LE1 543-3AB53-4AB0. Následně je proveden návrh úprav motoru, výpočet parametrů po jeho úpravě, vyhodnocení vlivu těchto úprav na přídatné ztráty a celkovou účinnost stroje.

# 1 Asynchronní motor s kotvou nakrátko

## 1.1 Konstrukční prvky asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Pro lepší pochopení funkce asynchronního motoru s kotvou nakrátko je na obrázku 1.1 zobrazen motor rozložený na jednotlivé konstrukční prvky.[1]



Obrázek 1.1: Rozložený motor s kotvou nakrátko

## 1.2 Princip funkce asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Základní princip asynchronního stroje je založen na vzájemné elektromagnetické vazbě mezi státorem, který vytvoří točivé magnetické pole ve vzduchové mezeře a rotorem, v jehož vinutí se vlivem točivého magnetického pole vyvolá elektrický proud. Právě proto, že je výkon přenášen elektromagnetickou indukcí se také říká indukční stroj. Vzduchová mezera mezi rotorem a státorem musí být co nejmenší, aby magnetická vazba byla co nejlepší. [1]

Aby se však v rotorovém vinutí indukovala elektromotorická síla a protékal jím proud, musí existovat relativní pohyb rotoru vzhledem k točivému poli statoru. Proto jsou otáčky zatíženého motoru vždy o něco nižší než synchronní otáčky točivého pole, tedy asynchronní.

Pokles otáček při zatížení je malý a je závislý na velikosti zatížení. Pokles otáček se nejčastěji udává jako skluz  $s$ , přičemž

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.1)$$

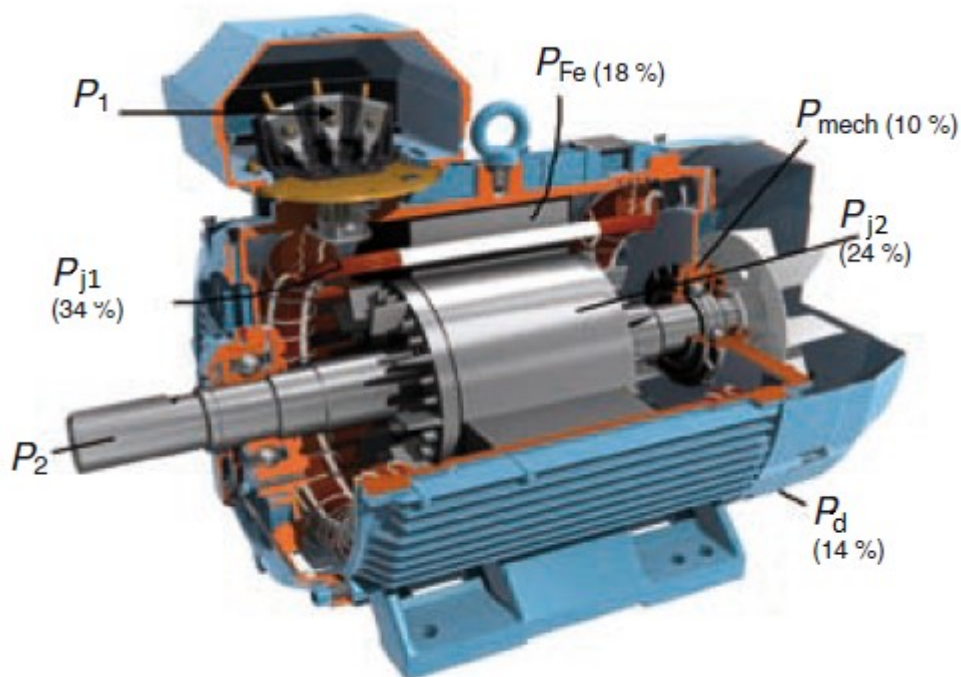
Při běžném síťovém kmitočtu 50Hz je teoreticky možné dosáhnout u dvoupólového stroje maximálně 3000 ot./min. Tyhle otáčky jsou nazývány synchronní a ve skutečnosti jsou vždy sníženy o skluz, který se vypočítá podle vzorce: 1.1 a liší se pro různé typy strojů. Otáčky snižené o skluz  $s$  se nazývají asynchronní, odtud také vznikl název asynchronní stroj. [1]

## 2 Účinnost a ztráty v asynchronním stroji

### 2.1 Ztráty v asynchronním stroji

V dnešní době se kladou velké nároky na snižování spotřeby elektrické energie. Jedním z hledisek, které mohou vést k úsporám elektrické energie je zvyšování účinnosti elektrických strojů. Účinnost  $\eta$  je poměr mezi mechanickým výkonem na hřídeli  $P_2$  a příkonem  $P_1$  dodaným ze sítě na svorky motoru. Účinnost je tedy měřítkem, jak je motor schopen převádět elektrickou energii na mechanickou. Ztráty, které vznikají v tomto procesu lze rozdělit do pěti základních skupin: [9]

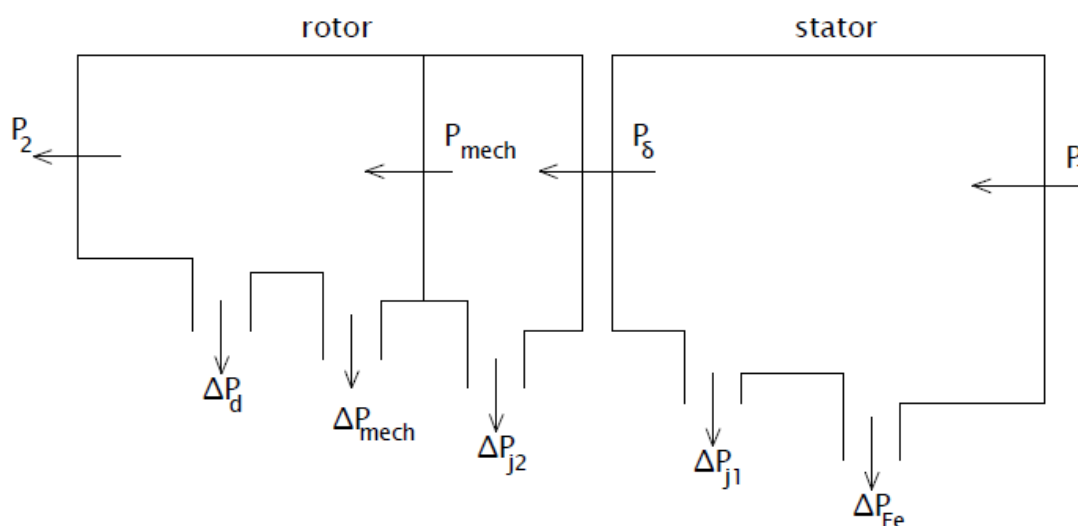
- Mechanické ( $P_{mech}$ )
- V železe ( $P_{Fe}$ )
- Ve vinutí statoru ( $P_{j1}$ )
- Ve vinutí rotoru ( $P_{j2}$ )
- Přídavné ( $P_d$ )



Obrázek 2.1: Procentuální rozdělení ztrát v AM

Z konstrukčního hlediska je důležité zvolit vhodné materiály a technologické postupy pro konstrukci motoru. Ztráty v železe lze ovlivnit použitím kvalitnějších materiálů pro magnetické obvody, například použití materiálu s co nejužší hysterezní smyčkou pro snížení hysterezních ztrát, které jsou úměrné ploše smyčky, nebo použití materiálů s pokud možno co největším elektrickým odporem pro snížení ztrát vířivými proudy, řeší se použitím vzájemně izolovaných tenkých plechů pro těleso statoru. Ztráty ve vinutí jsou závislé na odporu vinutí

a druhé mocnině proudu, lze je u rotoru snížit zvětšením rozměrů tyčí a kruhů, nebo použitím materiálů s lepší elektrickou vodivostí, což vede ke snížení elektrického odporu. Na ztráty ve vinutí statoru má vliv velikost drážky a tloušťka izolace - zmenší-li se tloušťka izolace, můžeme zvýšit průřez vodičů v drážce. Mechanické ztráty, vznikají třením v motoru a ventilací. Ztráty třením můžeme kompenzovat zejména použitím kvalitnějších ložisek, což se odrazí na ceně celého stroje a ventilační ztráty snížíme optimalizací chladicího mechanismu, jako například snížení odporu lopatek ventilátoru. Na ventilační ztráty mají vliv i veškeré nerovnosti a výstupky na rotoru, na příklad vyvažovací čepy a nerovnosti po odlévání vinutí. Motor s menšími ztrátami vyžaduje menší ventilátor a tím se sníží a hlučnost motoru. Velký význam pro návrh motoru má velikost vzduchové mezery mezi rotorem a statorem. Zmenšením mezery zlepšíme účinník a celkovou účinnost motoru. Extrémní zmenšení vzduchové mezery vede ještě k lepšímu účinníku, však účinnost se zmenší z důvodu vzniku pulzujícího magnetického pole způsobeného vzájemným překrýváním zubů statoru a rotoru. Dále je důležité při extrémně malé vzduchové mezeře posoudit vibrace rotoru, aby nedošlo ke kontaktu se statorem. [9]



Obrázek 2.2: Tok výkonu asynchronním motoru

- Elektrický příkon ( $P_1$ )
- Mechanický výkon na hřídeli ( $P_2$ )
- Přenášený výkon vzduchovou mezerou ( $P_\delta$ )
- Ztráty v železe ( $\Delta P_{Fe}$ )
- Joulovy ztráty ve statoru a rotoru ( $\Delta P_{j1}$ ,  $\Delta P_{j2}$ )
- Mechanické ztráty ( $\Delta P_{mech}$ )
- Ztráty přídavné ( $\Delta P_d$ )

## 2.2 Třídy účinnosti podle IEC 60034- 30-1

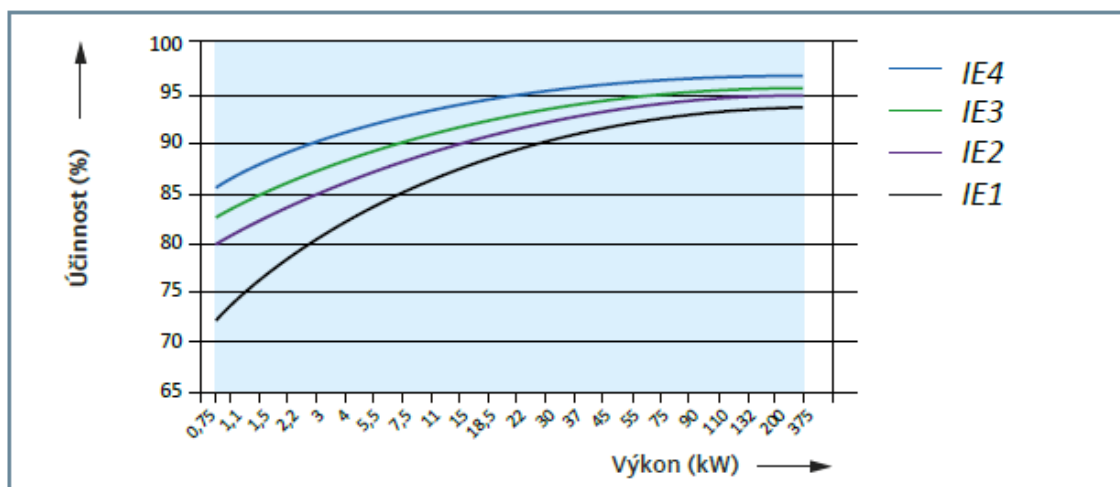
Za účelem snížení spotřeby elektrické energie a tím i obsahu  $\text{CO}_2$  vydala Evropská unie nařízení 640/2009 a dodatek 04/2014, které se týká spotřeby elektrické energie motorů v průmyslu. Toto nařízení je platné pro všechny státy EU. Nařízení v zásadě vychází z normy

IEC 60034- 30-1:2014, která určuje třídy účinností 50 a 60 Hz. Dále také udává, výjimky, pro které toto neplatí. [12]

Třídy účinnosti stanovuje norma ČSN EN (IEC) 60034-30 následovně:

- IE1 standardní účinnost (Standard)
- IE2 zvýšená účinnost (High)
- IE3 vysoká účinnost (Premium)
- IE4 velmi vysoká účinnost (Super-Premium)

V normě IEC 60034-2-1:2007, která v roce 2010 úplně nahradila normu IEC 60034-2 došlo k zásadní změně v určování přídavných ztrát motorů. Podle nové normy se přídavné ztráty nestanovují paušálně (0,5% z příkonu), ale vypočítávají se na základě měření.



Obrázek 2.3: Účinnost v závislosti na výkonu motoru podle tříd účinnosti.

### 3 Druhy ztrát v asynchronním stroji s kotvou nakrátko

#### 3.1 Mechanické ztráty

Mechanické ztráty ( $\Delta P_{mech}$ ) jsou tvořeny ztrátami při tření ložisek a ztrátami ventilačními, které jsou dány odporem vzduchu při otáčení rotoru. Tyto ztráty jsou však obtížně počitatelné a výpočty se provádí jen přibližně; přesněji mohou být tyto ztráty určeny měřením přímo na strojích.

Ztráty třením v ložiskách a ventilační ztráty v motorech s radiální ventilací bez radiálních ventilačních kanálů, s rotorem nakrátko a ventilačními lopatkami na kruzích nakrátko jsou:

$$\Delta P_{mech} = K_T \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot (10D_e)^3 \quad (3.1)$$

Mechanické ztráty pro motory s vnějším ofukováním ( $0,1 \leq D_e \leq 0,5$ ) m

$$\Delta P_{mech} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot (D_e)^4 \quad (3.2)$$

Veličina označená  $D_e$  představuje vnější průměr motoru,  $n$  mechanické otáčky a  $K_T$  je koeficient, který se určí následovně – pro dvoupólový stroj se rovná jedné; pro větší počet pólů se stanoví s pomocí vzorce  $K_T = 1,3 \cdot (1 - D_e)$ . [13]

##### 3.1.1 Ztráty třením

Ztráty třením udávají, kolik výkonu se spotřebuje třením v ložiskách. Určujícím faktorem je zejména zátěžná síla na ložisko a součinitel tření. U zaběhnutého motoru jsou tyto ztráty při stálé teplotě prakticky lineárně závislé na otáčkách.

$$\Delta P_{f1} = F_1 \cdot f_1 \cdot v \quad (3.3)$$

Kde:

$F_1$  je svislá síla na ložisko [N]

$f_1$  činitel tření v ložisku [-]

$v$  obvodová rychlost čepu [m.s-1]

Činitel tření v ložisku lze stanovit empirickým Falzovým vzorcem:

$$f_1 = 0,000472 \cdot \sqrt{\frac{n}{P_s}} \quad (3.4)$$

Kde:

$n$  jsou otáčky stroje [min-1]

$P_s$  je měrný tlak na čep hřídele [kg/cm<sup>2</sup>] [6]



### 3.1.2 Ztráty ventilační

Ventilační ztráty vznikají zejména odporem vzduchu kladeného lopatkám ventilátoru a jsou dány právě výkonem potřebným pro pohon ventilátoru. Tyto ztráty se vypočtou pomocí vztahu:

$$\Delta P_v = \frac{V \cdot \rho_v \cdot p_v}{\eta} \quad (3.5)$$

Kde	$V$	je množství hnaného vzduchu
	$\rho_v$	hustota vzduchu
	$p_v$	přetlak
	$\eta$	účinnost ventilátoru (zahrnuje i ztráty lopatek, bývá 0,2-0,3)

Mezi ventilační ztráty můžou být zahrnuty i ztráty způsobené pohybem vzduchu ve vzduchové mezeře. [14]

### 3.2 Ztráty elektrické

Elektrické ztráty v motoru vznikají průchodem proudu vinutím a jsou závislé na proudové hustotě ve vodiči a odporu vodičů, který se odvíjí od průřezu, délky a měrného odporu použitého materiálu. Průchodem elektrického proudu se vodič ohřívá a vzniká Jouleovo teplo, proto tyto ztráty také někdy označujeme jako Jouleovy ztráty. Teplo vyvolané ve vodiči pomocí průchodu proudu se vypočítá ze vztahu:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (3.6)$$

Zahříváním se zhoršují elektrické parametry vodiče, protože se jeho odpor zvyšuje s rostoucí teplotou. Vzhledem k tomu, že jsou vodiče umístěny v drážkách, je obtížné jejich chlazení.

Ze vztahu pro výpočet odporu vodiče:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (3.7)$$

vyplývá, že odpor vinutí snížíme zvětšením průřezu, nebo použitím materiálu s nižším měrným odporem. Použití kvalitnějších materiálů pro vodiče by bylo finančně náročné, tak je nutné zabývat se zvětšením drážek a tím zvětšením průřezu vodičů.

U rotorových vodičů s kotvou nakrátko můžeme snížit ztráty zvětšením průřezu tyčí, nebo použitím kvalitnějších materiálů. Standardně se používá pro rotorovou klec hliník litý pod tlakem do drážek. Použití mědi na rotorové tyče a spojovací kruhy je finančně a především technologicky mnohem náročnější. Z důvodu, že měď má mnohem vyšší teplotu tání než hliník, se z mědi rotorové klece neodlévají. Pokud je potřeba z důvodu vodivosti použít měď na rotorovou klec, vloží se do rotoru tyče, které se pájením spojí s čelními kruhy. [2] [4] [6]

Elektrické ztráty v rotoru a statoru se tedy vypočítají podle následujících vzorců:

$$\Delta P_{j1} = m \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (3.8)$$

$$\Delta P_{j2} = m \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (3.9)$$

### 3.3 Ztráty v železe

Ztrátami v železe jsou nazývány ztráty v magnetickém obvodu stroje. Magnetický obvod se skládá z dynamo plechů válcovaných za studena. Jednotlivé plechy jsou od sebe vzájemně izolovány lakem a uspořádány do svazku.

Působením střídavého magnetického pole na obvod vznikají magnetické ztráty v důsledku neustálého přemagnetování. Ztráty v železe se skládají z několika různých ztrát, jako jsou ztráty hysterezní  $P_h$ , ztráty vířivými proudy  $P_v$  a ztráty přídavné  $P_d$ . Všechny tyto ztráty jsou závislé na magnetické indukci a frekvenci.[6]

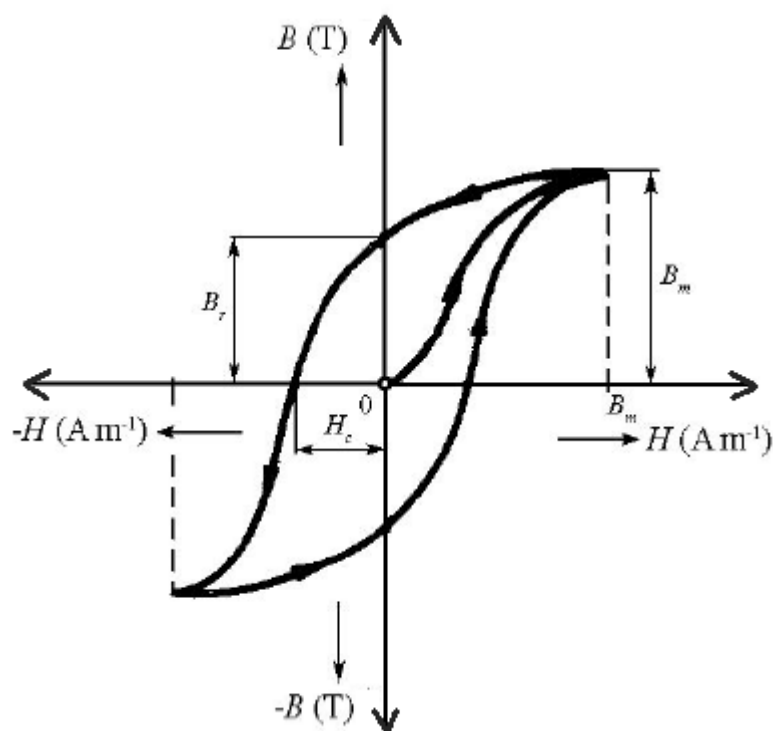
$$\Delta P_{Fe} = P_h + P_v + P_d \quad (3.9)$$

#### 3.3.1 Ztráty hysterezní

Hysterezní ztráty jsou přímo úměrné ploše hysterezní křivky daného materiálu a frekvenci napájecího napětí. Tyto ztráty lineárně závisí na frekvenci a jsou časově nezávislé. [2][6]

$$P_h = S_h \cdot V \cdot f \quad (3.10)$$

Kde	$S_h$	je plocha statické hysterezní smyčky [m <sup>2</sup> ]
	$V$	objem [m <sup>3</sup> ]
	$f$	frekvence [Hz]



Obrázek 3.1: Statická hysterezní smyčka

### 3.3.2 Ztráty vířivými proudy

Vznikají v důsledku průchodu proudu naindukovaného v magnetickém obvodu. Velikost vířivých proudů závisí především na tloušťce plechů a jejich elektrickém odporu. Z důvodu omezení těchto ztrát se magnetický obvod vyrábí z mnoha plechů poskládaných v jeden celek. Zvětšením elektrického odporu mezi plechy se minimalizuje proud protékající magnetickým obvodem a tím i ztráty. Vířivé proudy jsou závislé na kvadrátu kmitočtu a indukce.[11]

$$P_v = \frac{3V}{4\rho} k^2 h^2 f^2 B_m^2 \quad (3.11)$$

Kde	$\rho$	rezistivita feromagnetika	$[\Omega\text{m}]$
	$h$	tloušťka feromagnetika	$[m]$
	$B_m$	maximální hodnota magnetické indukce	$[T]$
	$k$	činitel tvaru křivky indukovaného napětí	

Ztráty v železe asynchronních strojů se počítají pouze ve statoru. Pokud stroj pracuje ve stavu, kdy jeho parametry dosahují hodnot uvedených na štítku (jmenovitých hodnot), je frekvence přemagnetování rotoru velmi nízká a ztráty v jeho železe jsou zanedbatelné. [11]

### 3.4 Přídavné ztráty

#### 3.4.1 Povrchové ztráty naprázdno

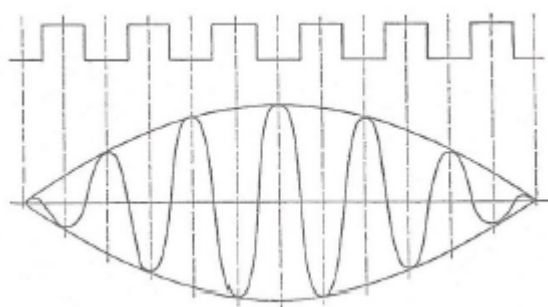
Nejprve uvažujme průběhy u stroje s hladkým rotorem a drážkovaným statorem. Průběh intenzity magnetického pole o  $2p$  pólových dvojicích se deformuje vlivem drážkování statoru. Výsledné pole je dáno superpozicí původního pole o intenzitě:

$$H_0(\alpha, t) = H_0 \cdot \cos(\omega t - 2p\alpha) \quad (3.12)$$

a přídavné pole o intenzitě:

$$H_1(\alpha, t) = H_1 \cdot \cos(\omega t - p\alpha) \cdot \cos \cdot Z_1 \cdot \alpha, \quad (3.13)$$

při zanedbání vyšších harmonických. Výsledné pole je znázorněno na obrázku 3.2.



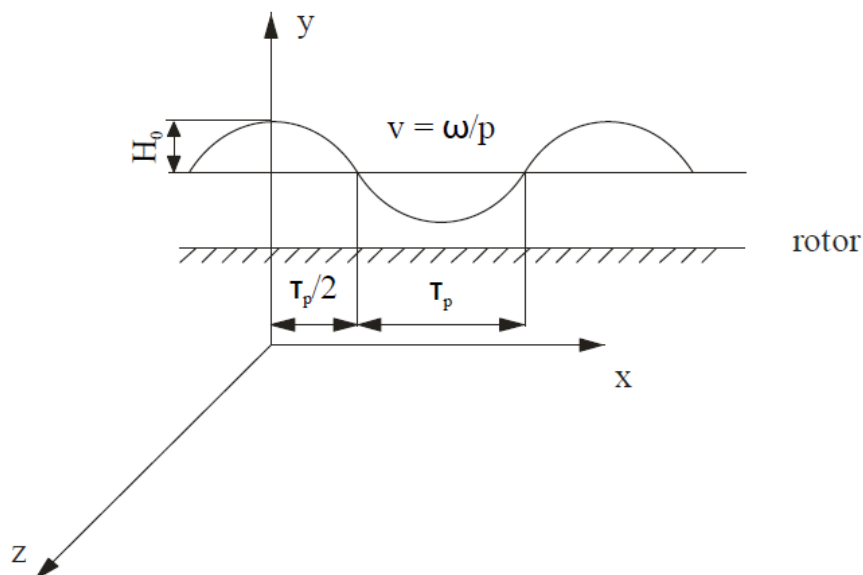
Obrázek 3.2: Průběh přídavného pole

Otáčí-li se rotor při normálním chodu vzhledem k přídavnému poli o intenzitě  $H_1(\alpha, t)$  prakticky synchronní rychlostí  $\omega$ , vznikají na povrchu rotoru vířivé proudy, které způsobují přídavné ztráty, v jejichž důsledku se otepluje železo rotoru. Obdobným způsobem vznikají ztráty na povrchu statoru vlivem drážkování rotoru.

Pro výpočet povrchových ztrát se uvažuje případ velmi dlouhého masivního válce (rotoru), kolem něhož obíhá magnetické pole o intenzitě:

$$H'(\alpha, t) = H_0 \cdot \cos\left(\omega t * -\frac{\pi}{\tau_p} x\right), \quad (3.14)$$

které dostaneme podle obr.: 3.3. V rovnici: 3.14 značí  $\tau_p = \pi D / 2p$  rozteč pólů [m] a  $x$  vzdálenost od počátku souřadnic po ose  $x$  [m]. [15]



Obrázek 3.3: Průběh magnetického pole k výpočtu povrchových ztrát

Toto pole indukuje v masivním rotoru o permeabilitě  $\mu$  a specifickém odporu  $\varrho$  vířivé proudy. Magnetické pole ve vzduchové mezeře a v masivním rotoru má pak jen složky intenzity  $H_x$  a  $H_y$ , kdežto vířivé proudy v rotoru mají jen složku  $I=I_z$ . [15]

Celkový výkon  $P_v$  vířivých proudů na povrchu rotoru je při velikosti povrchu  $S=2\pi\tau_p l$

$$P_v = \frac{2pl}{k} (\alpha\tau_p)^3 \left( \frac{B_0}{\pi\mu_0\mu_r} \right)^2 \quad (3.15)$$

kde  $k=1/\varrho$  udává měrnou vodivost rotoru.

Pro výpočet povrchových ztrát na rotoru způsobených drážkováním statoru je nutno do rovnice dosadit místo počtu pólpárů indukující pole počet drážek statoru  $Z_1$ , za pólovou rozteč  $\tau_p$  polovinu drážkové rozteče  $1/2t_{d1}$  a za časovou kruhovou frekvenci  $\omega = \frac{1}{30}\pi Z_1 n_s$ , kde  $n_s$  jsou synchronní otáčky stroje.

Úpravou rovnice pro vířivý výkon dostaneme:

$$P_v = \frac{2Z_1 l}{k} \left( \alpha' \frac{t_{d1}}{2} \right)^3 \left( \frac{B_0}{\pi\mu_0\mu_r} \right)^2 \quad (3.16)$$

$$\alpha' = \sqrt{\frac{\pi k \mu_0 \mu_r Z_1 n_s}{60}} \quad (3.17)$$

S ohledem na uvažovaný povrch  $S=lZ_1 t_d$  jsou měrné povrchové ztráty vztažené na jednotku plochy povrchu

$$P'_v = \frac{P_v}{S} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{1}{\pi q \mu_0 \mu_r}} \left( \frac{Z_1 n_s}{60} \right)^{1,5} (B_0 t_d)^2 \quad (3.18)$$

Dosadíme-li do rovnice B v gaussech,  $t_d$  v cm a  $q$  v  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , dostaneme po úpravě:

$$P'_v = k_0 \left( \frac{Z_1 n_s}{10000} \right)^{1,5} \left( \frac{B_0 t_d}{1000} \right)^2 10^{-4} \quad (3.19)$$

$$k_0 = \frac{272}{\sqrt{\mu_r q}} \left[ \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}} \right] \quad (3.20)$$

Rovnice: 3.19 udává vířivé ztráty na povrchu masivního rotoru, za předpokladu, že magnetická indukce  $B$  je ve vzduchové mezeře podél celého vrtání konstantní. Tento případ odpovídá například poměrům v synchronním stroji při konstantní vzduchové mezeře pro stanovení ztrát na povrchu masivního pólu vlivem drážkování statoru. Pro střední hodnoty  $q=0,1\Omega\text{mm}^2/\text{m}$  a  $\mu_r=2000$  je v rovnici: 3.20 koeficient  $k_0=19,3$ . Použitím tenkých plechů se povrchové ztráty značně snižují. Toto však platí jen za předpokladu, že se po složení povrch již neopracovává. V případě dodatečného opracování je nutno dosadit hodnoty jako pro masivní povrch. Pro výpočet přídatných ztrát platí rovnice: 3.19, přičemž hodnota koeficientu  $k_0$  je uvedena v tabulce:

Masivní povrch z kujného železa	$k_0=23,3$
Masivní povrch z litiny	$k_0=17,5$
Rotor skládaný z plechů o tloušťce 2mm	$k_0=8,6$
Rotor skládaný z plechů o tloušťce 0,55mm	$k_0=2,8$

Pro stanovení přídatných ztrát v asynchronním motoru na povrchu rotoru vlivem drážkování statoru je nutno do rovnic dosadit místo  $B_0$  efektivní hodnotu indukce  $\frac{B_0}{\sqrt{2}}$ , protože střední indukce  $B_d$  je ve vzduchové mezeře podél vrtání sinusově rozložená. Pro přídatné ztráty na povrchu rotoru  $P_{v2}$  vzniklé drážkováním statoru platí následující rovnice:

$$P_{v2} = \frac{k_0}{2} (Z_1 n_s)^{1,5} (B_{01} t_{d1})^2 \pi D l \left( \frac{t_{d1} - o_1}{t_{d1}} \right) \quad [\text{W}] \quad (3.21)$$

kde:

$$B_{01} = \beta_1 k_{o1,2} B_\theta \quad [\text{T}]$$

$$\beta_1 = \frac{b_{02}}{\delta}$$

Obdobně určíme velikost přídatných ztrát na povrchu statoru způsobené drážkováním rotoru:

$$P_{v1} = \frac{k_0}{2} (Z_2 n_s)^{1,5} (B_{02} t_{d2})^2 \pi D l \left( \frac{t_{d2} - o_2}{t_{d2}} \right) [\text{W}] \quad (3.22)$$

kde

$$B_{02} = \beta_2 k_{o1,2} B_\theta [\text{T}] \quad [15]$$

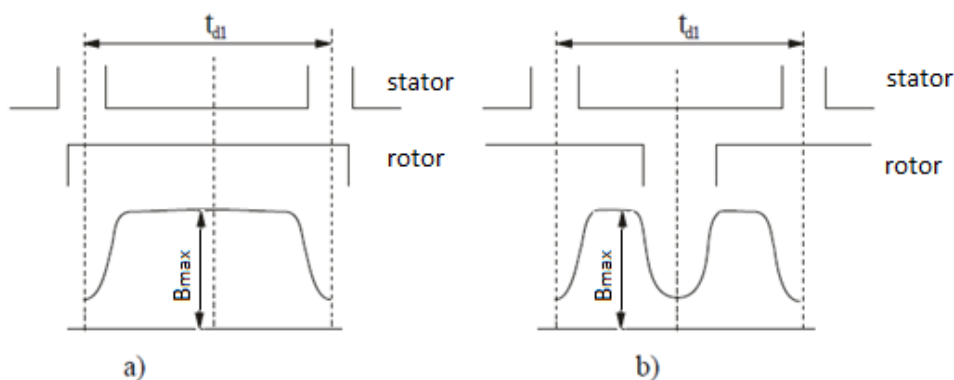
$$\beta_2 = \frac{b_{01}}{\delta} [-]$$

$b_{01,2}$  je velikost otevření statorové, rotorové drážky [mm]

$\delta$  je velikost vzduchové mezery [mm]

### 3.4.2 Pulzační ztráty naprázdno

V důsledku drážkování statoru a rotoru je magnetická indukce v zubech závislá na jejich vzájemné poloze proti sobě. Je-li například zub statoru a rotoru naproti sobě, je magnetická vodivost vzduchové mezery maximální. Naopak, je-li zub naproti drážce, je magnetická vodivost vzduchové mezery minimální. Průběh magnetické indukce nad drážkovou roztečí  $t_{d1}$  při jednotkovém magnetickém napětí mezi státorem a rotorem je zobrazen na obrázku: 3.4, kde a) znázorňuje případ, kdy jsou zuby naproti sobě a b) případ, kdy je zub proti drážce. [15]



Obrázek 3.4: Průběh magnetické indukce v závislosti na poloze zubů statoru a rotoru

Pohybuje-li se rotor relativně ke statoru, mění se periodicky magnetická vodivost a tím i magnetický tok drážkovou roztečí. Tok  $\Phi$  procházející statorovým zubem pak pulzuje mezi svou maximální a minimální hodnotou, tím vznikají v železe statoru ztráty vířivými proudy. Těmto ztrátám říkáme pulzační ztráty. Pro rotor pak platí obdobné úvahy. Magnetický tok jdoucí zubem statoru při předpokladu varianty podle obrázku a) je dán vztahem:

$$\Phi_1 = \int_{-\frac{1}{2}t_{d1}}^{+\frac{1}{2}t_{d1}} f(x) dx \quad (3.23)$$

Obdobně pak pro variantu b) :

$$\phi_2 = \int_{-\frac{1}{2}t_{d1}}^{+\frac{1}{2}t_{d1}} f(x)dx \quad (3.24)$$

Otáčeli-li se rotor synchronními otáčkami, mění se vzájemná poloha zubů s kmitočtem  $f_1=Z_2f$ . Magnetický tok v zubech pulzuje s tímto kmitočtem, přičemž amplituda střídavé složky toku je:

$$\phi_P = \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} = k_\phi \cdot \phi_0 \quad (3.25)$$

Kde  $\phi_0 = \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2)$  je střední magnetický tok zubem statoru a  $k_\phi = \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1 + \phi_2}$ .

V tomto případě musí tedy pro odpovídající indukci pulzujícího toku v zubu statoru  $B_p$  platit rovněž:

$$B_p = k_\phi B_{0z}, \quad (3.26)$$

Kde  $B_{0z}$  značí střední indukci v zubu statoru. Koeficient  $k_\phi$  lze určit integrací předchozích rovnic, jako:

$$k_\phi = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{d1}}. \quad (3.27)$$

Dosadíme-li do rovnice: 3.26, dostaneme:

$$B_{p1} = B_{0z1} \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{d1}}. \quad (3.28)$$

Měrné pulzační ztráty v zubech statoru vlivem pulzace toku s frekvencí  $f_z=Z_1f$  jsou:

$$P_{p1} = \sigma \left( \frac{f_z B_{p1}}{100} \right)^2 \quad (3.29)$$

Pro dynamoplech o tloušťce 0,5mm a ztrátovém čísle  $V_{10}=3[W/kg]$  platí přibližně

$$\sigma = 3,5[Ws^2/kgT^2].$$

Vzhledem k tomu, že střední indukce  $B_{0z}$  a tím i amplituda pulzace  $B_p$  je u asynchronního motoru podél vrtání rozložena sinusově, musíme za  $B_p$  dosadit efektivní hodnotu.

Respektujeme-li vliv opracování koeficientem 1,8 a dosadíme-li zubovou frekvenci  $f_z = n_s Z_2 / 60$ , dostaneme upravenou rovnici pro pulzační ztráty v zubech statoru:

$$P_{p1} = (3n_s Z_2 B_{p1})^2 \cdot 10^{-8} \quad (3.30)$$

Měrné pulzační ztráty v rotoru určíme analogicky změnou příslušných koeficientů. [15]



### 3.4.3 Přídavné ztráty klecové kotvy naprázdno

Na základě úvahy, že na klecové vinutí rotoru mající  $Z_2$  tyčí působí drážkové pole statoru mající  $Z_1$  tyčí o magnetické indukci

$$B(\alpha, t) = B_\delta \frac{a_1}{2a_0} \sin(\omega t - Z_1 \alpha), \quad (3.31)$$

které způsobuje přídavné ztráty.

Amplituda magnetoelektrické síly působící polem statoru o  $Z_1$  pólových dvojicích na rotor o  $Z_2$  tyčích na pól pár se vypočte:

$$F_2 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} I_2. \quad (3.32)$$

Na základě vzorce pro rotorový kmitočet  $f' = (Z_1/p)f$ , z čehož vyplývá  $f' \gg f$ , můžeme předpokládat, že  $I_2$  je čistě reaktivní.

Potom platí

$$B_\delta \frac{a_1}{2a_0} = \mu_0 a_0 I_2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} I_2 (1 + \tau) \quad (3.33)$$

kde  $\tau$  je celkový činitel rozptylu.

Po úpravě  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  vyplývá

$$I_2 = 1,77 B_\delta \frac{a_1}{2a_0} \frac{1}{a_0} \frac{Z_1}{Z_2} \frac{1}{1 + \tau} 10^6 \quad (3.34)$$

Celkové ztráty obou drážkových polí se pak po úpravách vypočítají podle vztahu

$$P_{20} = 6,25 B_{p\delta}^2 (k_{c1} \delta)^2 \left( \frac{a_1}{2a_0} \right)^2 \left( \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \frac{R_2 Z_2 k_f}{(1 + \tau)^2} 10^3 \quad (3.35)$$

Činitel rozptylu  $\tau$  je dán součtem činitelů rozptylu drážkového, v čelech a diferenčního. V případě, že  $Z_2/Z_1 \ll 2$ , což nastává u vysokonapěťových strojů, je činitel diferenčního rozptylu  $\tau_d \gg 1$ , takže stačí uvažovat  $\tau \cong \tau_d$ . [15]

### 3.4.4 Přídavné ztráty klecové kotvy na prázdno při zešikmení

V případě zešikmení rotorových tyčí musíme uvažovat dva různé případy. V prvním případě jsou tyče rotoru proti železu izolovány a ve druhém nejsou.

V případě šikmých izolovaných tyčí platí při chodu naprázdno pro ztráty vztah

$$P_{20s} = \frac{P_{20}}{2} \left\{ \left[ \frac{\sin \frac{b\pi}{t_{d1} Z_1} (Z_1 + p)}{\frac{b\pi}{t_{d1} Z_1} (Z_1 + p)} \right]^2 + \left[ \frac{\sin \frac{b\pi}{t_{d1} Z_1} (Z_1 - p)}{\frac{b\pi}{t_{d1} Z_1} (Z_1 - p)} \right]^2 \right\}, \quad (3.36)$$

kde  $P_{20}$  jsou ztráty při rovných tyčích,  $Z_1$  je počet statorových drážek,  $t_{dl}$  drážková rozteč statoru a  $b$  je velikost zešíkmení měřená ve směru osy stroje. Při natočení o jednu statorovou rozteč platí  $b=t_{dl}$  a výraz přejde do tvaru

$$P_{20\delta} = \frac{P_{20}}{2} \left\{ \left[ \frac{\sin \pi \frac{Z_1+p}{Z_1}}{\pi \frac{Z_1+p}{Z_1}} \right]^2 + \left[ \frac{\sin \pi \frac{Z_1-p}{Z_1}}{\pi \frac{Z_1-p}{Z_1}} \right]^2 \right\}, \quad (3.37)$$

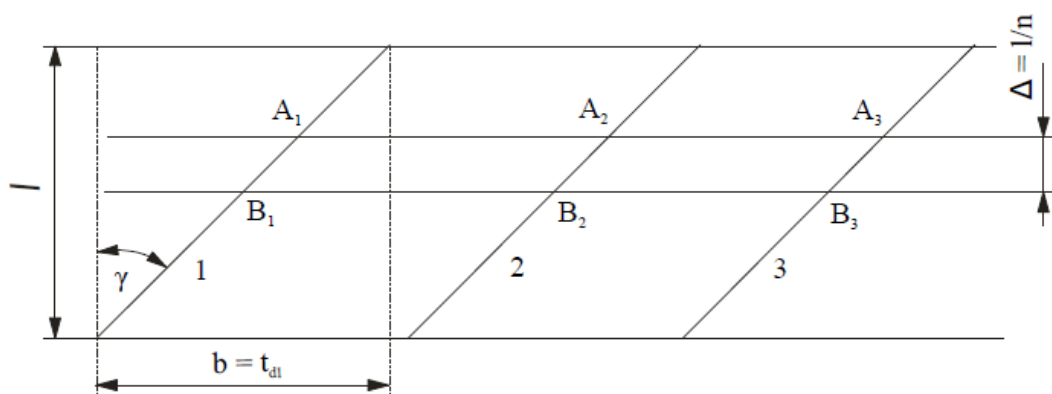
který můžeme pro  $Z_1 \gg p$  upravit na jednoduchý výraz

$$P_{20\delta} = P_{20} \left( \frac{p}{Z_1} \right)^2, \quad (3.38)$$

z čehož vyplývá, že u izolovaných tyčí zešíkmených o jednu statorovou rozteč klesnou přídatné ztráty na zanedbatelnou hodnotu.

Složitější případ je u neizolovaných tyčí, protože zde mohou téct příčné proudy železem mezi tyčemi. Přesný výpočet těchto proudů je však velmi komplikovaný, protože nejsou známy všechny veličiny, jako je například příčná impedance železa ovlivněná přechodovým odporem mezi tyčí a železem a jiné. Proto se používá přibližný jednodušší způsob, který však dává dobrý přehled o celém fyzikálním pochodu.

Na obrázku 3.5 je naznačen rozvinutý povrch rotoru o osové délce  $l$ , jehož neizolované tyče jsou zešíkmeny ve směru vrtání o délku  $b=t_{dl}$ . Příčnou vodivost naznačují fiktivní spojky, které spojují tyče mezi sebou. Na obrázku jsou naznačeny dvě takové spojky ( $A_1A_2A_3 \dots A_{Z_2}$ ) a ( $B_1B_2B_3 \dots B_{Z_2}$ ) vzdálené od sebe o  $\Delta=l/n$ , kde  $n$  je počet fiktivních spojek. Tím se celá klecová kotva rozpadá do  $(n+1)$  fiktivních klecí, z nichž každá má  $Z_2$  tyčí a axiální délku  $\Delta=l/n$ . Jak je patrné z obrázku 3.5, je každá fiktivní klec tvořena  $Z_2$  „tyčemi“ ( $A_1B_1$ ), ( $A_2B_2$ ), ... a dvěma fiktivními čelními kruhy ( $A_1A_2A_3 \dots$ ) a ( $B_1B_2B_3 \dots$ ). [15]



Obrázek 3.5: Rozvinutý povrch rotoru

V případě, že by byla impedance fiktivních čelních kruhů nulová, vypočetl by se proud jednou tyčí pomocí rovnice

$$I_t = 1,77 B_\delta \frac{a_1}{2a_0} \cdot \frac{1}{a_0} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{1}{1 + \tau'_d} \cdot 10^6 \quad (3.39)$$

Ve skutečnosti je však impedance fiktivních čelních kruhů mnohonásobně větší, než impedance tyčí vlivem přechodového odporu. Platí tedy  $Z_q \gg Z_l$ , z čehož vyplývá, že proud  $I_t$  bude mnohem menší, než udává rovnice 3.39. Z toho důvodu se rovnice vynásobí součinitelem  $\gamma_P$ , který vyplývá z řady měření. Pro případ, kdy platí, že poměr vrtání stroje  $D$  k osové délce  $l$   $D/l > 1$  volíme  $\gamma_P = 0,3 \div 0,4$ .

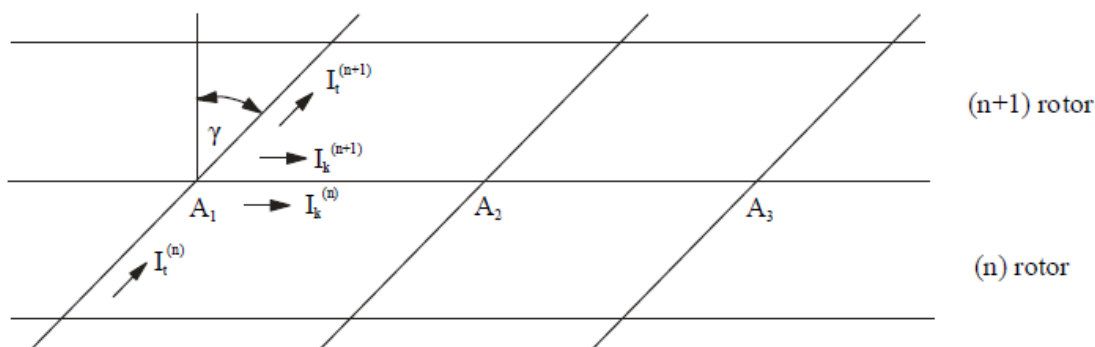
Upravená rovnice pro proud v jedné tyči při zvolení  $\gamma_P=0,53$  bude

$$I_t = 0,31 \frac{a_1}{a_0} \cdot \frac{B_\delta}{a_0} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{1}{1 + \tau'_d} \cdot 10^6 \quad (3.40)$$

Pro proud v kruhu  $n$ -tého elementárního rotoru platí rovnice

$$I_k^{(n)} = \frac{I_t^{(n)}}{2 \sin \frac{Z_1}{Z_2} \pi} \quad (3.41)$$

Obdobné vztahy platí pro  $(n+1)$  elementárního rotoru, jenže příslušné vektory  $I^{(n+1)}$  jsou natočeny oproti proudům  $I^{(n)}$  o elektrický úhel  $(l/R) Z_l$  ( $\gamma/n$ ), kde podle obrázku 3.6, je  $\tan \gamma = b/l$  a  $R$  je poloměr vrtání stroje.

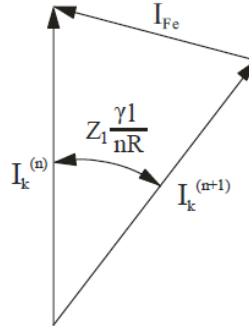


Obrázek 3.6: Poměry pro  $n$  a  $(n+1)$

Jak je patrné z obrázku 3.6, protéká fiktivním čelním kruhem ( $A_1 A_2$ ) proud  $I_{Fe}$ , který je vektorovým rozdílem  $I_k^n$  a  $I_k^{(n+1)}$ . Z vektorového diagramu na obrázku 3.7, určíme vztah pro proud železem

$$I_{Fe} = 2I_k \sin \frac{l}{R} \frac{Z_1 \gamma}{2n} \cong I_k \frac{bZ_1}{Rn} \quad (3.42)$$

Ze vztahu vyplývá, že pokud je zešíkmeni  $\gamma = 0$ , pak i proud železem  $I_{Fe}$  bude nulový. Izolovaná klec s natočenými drážkami je ekvivalentní neizolované kleci s nenatočenými drážkami. Tento výsledek však platí jen tehdy, je-li impedance skutečných čelních kruhů nulová, nebo když je poměr příčné impedance  $Z_q$  a podélné impedance  $Z_l$  mnohem větší, než 1 ( $Z_q/Z_l \gg 1$ ), což je u neizolovaných klecí prakticky vždy splněno. [15]



Obrázek 3.7: Vektorový diagram proudů v rotoru

Pro ztráty vyvolané proudem  $I_{Fe}$  v železe na délce  $A_1A_2$  platí

$$P_{A_1A_2} = I_{Fe}^2 R_{A_1A_2}, \quad (3.43)$$

kde  $R_{A_1A_2}$  je odpor části fiktivního čelního kruhu ( $A_1A_2$ ). Pokud budeme předpokládat, že odpor  $R_{A_1A_2}$  je roven odporu železa mezi  $A_1$  a  $A_2$ , pak dostaneme

$$R_{A_1A_2} = \rho_{Fe} \frac{\pi D}{Z_2 S}, \quad (3.44)$$

kde  $D$  je průměr kotvy  $[m]$  a  $S$  průřez železa  $[m^2]$

$$S = h \Delta \quad (3.45)$$

Pro hloubku vniku  $h$  v rovnici platí

$$h = \frac{3,32}{\sqrt{\frac{50Z_1}{p}}} \sqrt{\frac{2,5I_{Fe}}{\Delta}} \cdot 10^{-4} \quad (3.46)$$

Po dosazení  $I_{Fe}$  z rovnice 3.43 dostaneme

$$h = 3,3 \sqrt{\frac{p}{10Z_1} \frac{\pi I_k}{\Delta n}} \cdot 10^{-4} \quad (3.47)$$

Celkové ztráty v celém fiktivním  $n$ -tém rotorovém kruhu jsou

$$P^{(n)} = Z_2 P_{A_1 A_2} = \frac{(2\pi I_k)^2}{n^2} \cdot \frac{\rho_{Fe}}{h} \cdot \frac{n}{l} \cdot \pi D \quad (3.48)$$

V celém rotoru pak

$$P_s = \sum^n P^{(n)} = (2\pi I_k)^2 \rho_{Fe} \frac{\pi D}{hl} \cdot 10^{-3} \quad (3.49)$$

Vzhledem k tomu, že na klec působí drážková pole statoru o  $(Z_1+p)$  a  $(Z_1-p)$  pólových dvojicích, dostaneme pro celkovou ztrátu obou drážkových polí

$$P_{cFe} = 0,145 \cdot I_{k\phi Fe}^2 \frac{D}{h} \cdot 10^{-3} , \quad (3.50)$$

kde hloubka vniku

$$h = 3,3 \sqrt{\frac{\sqrt{2} \pi p I_k \cdot 10}{Z_{1l}}} \cdot 10^{-3} \quad (3.51)$$

Dosadíme-li hloubku vniku do předchozí rovnice, dostaneme po úpravě

$$P_{cFe} = 1,45 D \sqrt{\frac{I_k^3 Z_1}{pl}} \cdot 10^{-3} \quad (3.52)$$

Celkové ztráty  $P_{r0}$  v tyčích a v železe rotoru při natočených neizolovaných drážkách se pak rovná součtu ztrát v tyčích  $P_{2t} = 0,13 P_{20}$  a ztrát v železe  $P_{cFe}$  podle rovnice

$$P_{r0} = 0,13 P_{20} + P_{cFe} . \quad (3.53)$$

Faktor  $0,13=(0,31/0,88)^2$  vznikne z poměru  $(I_1/I_2)$ .

Jak je patrné z předešlé úvahy, zešíkmením drážek se sice zmenší ztráty v samotné kleci, ale oproti tomu přibudou ztráty způsobené příčnými proudy v železe, což má za následek, že v celkových ztrátách nebude u neizolovaných rotorových tyčí velký rozdíl proti ztrátám v rotoru s tyčemi rovnými.

Dále je nutno podotknout, že odvozené vztahy jsou jen přibližné a platí v případě, že  $D/l > 1$ . Hlubší rozbor vlivu zešíkmení drážek bude probrán ještě v kapitole 3.4.6. [15]

### 3.4.5 Přídavné ztráty při zatížení

Měřením na asynchronních strojích bylo zjištěno, že mimo známé ztráty naprázdno a nakrátko se v motorech vyskytují ještě ztráty závislé na zatížení. Jsou to tzv. přídavné ztráty při zatížení, které se určí odečtením ztrát naprázdno a nakrátko z rozdílu příkonu a výkonu. Řada

starších norem uváděla, že přídatné ztráty naprázdno jsou 0,5% výkonu a s tím se i počítalo. Přesnější měření však ukázala, že tohle platí pouze pro kroužkové motory, ale motory s kotvou nakrátko mohou dosáhnout mnohem vyšších hodnot (normálně  $1 \div 2\%$ , vyjíměčně  $4 \div 5\%$ ).

Fyzikální příčinou těchto ztrát jsou vyšší harmonické magnetomotorické síly, které vyvolávají povrchové a pulzační ztráty. U motorů s kotvou nakrátko se pak ještě vyskytují přídatné ztráty v kleci v případě rovných tyčí a v případě šikmých neizolovaných tyčí jsou to ztráty vlivem proudů tekoucích železem od jedné tyče ke druhé.

Přesné výpočet těchto ztrát je však velmi obtížný a pro neurčitost příčné impedance klece téměř nemožný. Podle měření p. Odokova se totiž velikost přechodového odporu mezi tyčí klece a železem rotoru mění až o tři řády. Proto se doporučuje respektovat vliv šikmých drážek empirickým činitelem, kterým by se násobily ztráty při rovných tyčích.

Podle teoretických úvah i podle měření jsou přídatné ztráty při zatížení  $P_{dz}$  úměrné druhé mocnině zatěžovacího proudu. Vzhledem k tomu, že přídatné ztráty odpovídající proudu naprázdno jsou obsaženy ve ztrátách naprázdno, pak platí.[15]

$$P_{dz} = k(I - I_0)^2 \quad (3.54)$$

### 3.4.6 Vliv zešikmení drážek na přídatné ztráty při zatížení

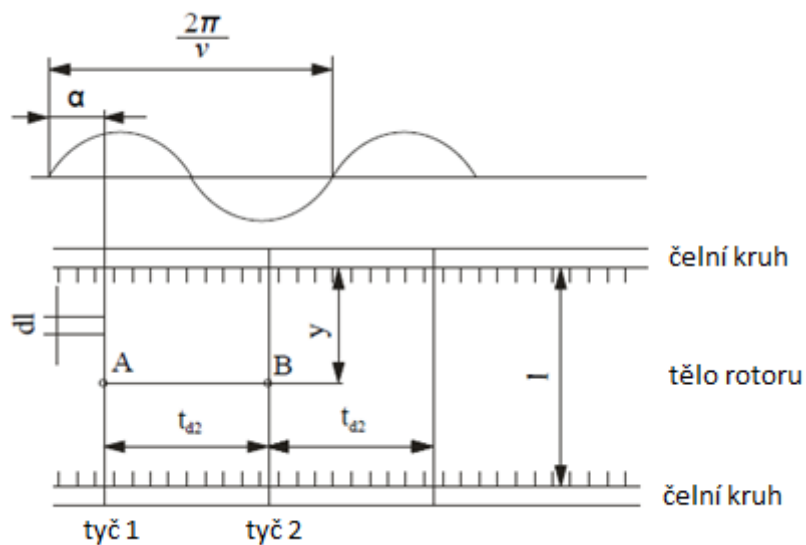
Zešikmením rotorových drážek o jednu statorovou rozteč lze prakticky potlačit parazitní momenty vyvolané stupňovými harmonickými. Tímto způsobem lze také úplně vymýtit přídatné ztráty klecové kotvy způsobené při chodu naprázdno otevřením statorových drážek a stupňovými harmonickými při zatížení. Vezmeme-li však v úvahu teorii popsanou v kapitole 3.4.4, uplatní se vliv zešikmení drážek rotoru pouze, pokud jsou tyče klece plně izolovány proti železu rotoru. Pokud nebudou tyče izolovány, zůstanou přídatné ztráty prakticky stejné jako u rovných tyčí. Příčinou těchto ztrát však budou proudy tekoucí železem rotoru od jedné tyče ke druhé. Z důvodu těžce zjistitelného přechodového odporu mezi železem rotoru a tyčí by byl analytický rozbor obtížný a bezúčelný. Rozbor problematiky v téhle kapitole má tedy spíše kvalitativní charakter a umožňuje pochopení složitých dějů, které se v rotoru při šikmých neizolovaných tyčích v rotoru vyskytují.

Pro jednoduchost nejprve uvažujeme neizolovanou rovnou klec, pohybující se rychlostí  $v$  v magnetickém poli  $v$  harmonického řádu. V tomto případě se v každém elementu  $dl$  tyče 1 indukuje napětí  $de = B \sin \alpha \, dl \, v$  a v každém elementu tyče 2 napětí  $de = B \sin (\alpha + v t_{d2}) \, dl \, v$ . Podobně se v elementu  $n$ -té tyče indukuje napětí.

$$de = B \sin[\alpha + v(n - 1)t_{d2}] \, dl \, v \quad (3.55)$$

Výsledné napětí indukované v celé  $n$ -té tyči bude

$$e_n = B \sin[\alpha + v(n - 1)t_{d2}] \, lv \quad (3.56)$$



Obrázek 3.8: K výpočtu přídavných ztrát vlivem příčných proudů

Je-li zanedbatelná impedance čelních kruhů, spotřebuje se napětí  $de$  indukované v elementu  $dl$  na krytí úbytku v tomto elementu. Z toho plyne, že mezi body A a B na sousedních tyčích 1 a 2, ležících ve stejné vzdálenosti  $y$  od kraje rotoru, není žádný rozdíl potenciálů a tím pádem nemůže téci žádný proud železem mezi body A a B.

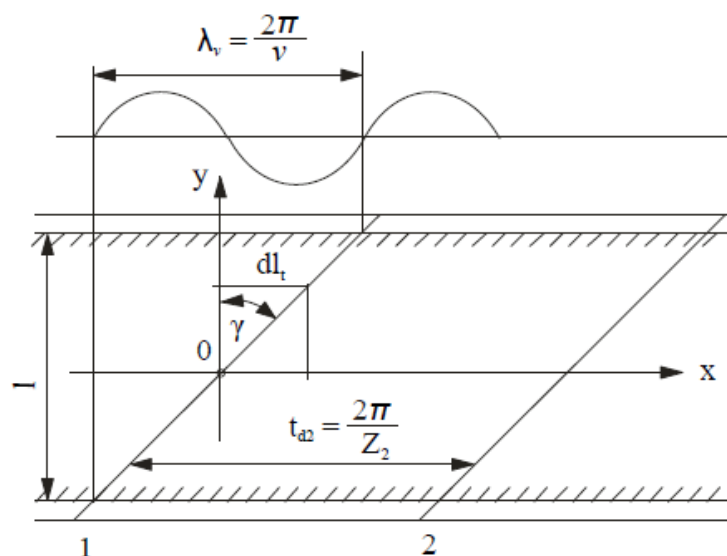
U klece, jejíž neizolované tyče jsou natočeny o vlnovou délku harmonického řádu  $v$ ,

$$\lambda_v = \frac{2\pi}{v}, \quad (3.57)$$

jsou poměry jiné. Napětí indukované v elementu tyče  $dl$  v místě  $(x, y)$ , má hodnotu

$$de = B \sin(\alpha + vy \operatorname{tg} \gamma) v dy, \quad (3.58)$$

kde  $\gamma$  je úhel zešikmení tyče, pro nějž platí  $\operatorname{tg} \gamma = 2\pi/v$ .

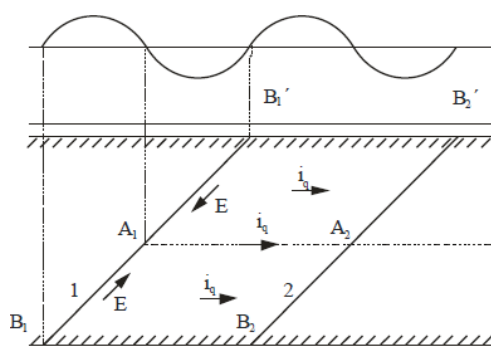


Obrázek 3.9: K výpočtu přídavných ztrát vlivem příčných proudů

Zvolený souřadný systém má počátek v bodě 0 v polovině délky tyče 1. Pro výsledné napětí  $e$  indukované v celé tyči harmonickou řadu  $v$  platí

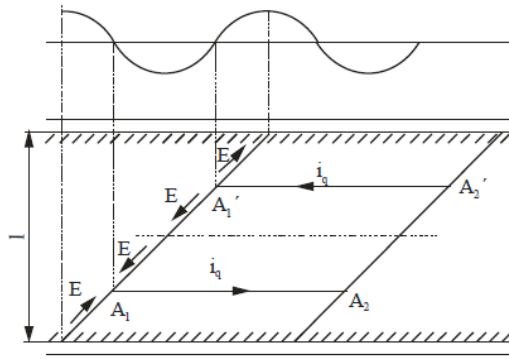
$$e = Bv \int_{-\frac{1}{2}l}^{\frac{1}{2}l} \sin(\alpha + vy \tan \gamma) dy = 0. \quad (3.59)$$

Při natočení klece o vlnovou délku harmonického řádu  $v$  je výsledné napětí indukované tímto polem v celé tyči nulové. Nevzniká tedy žádný proud tekoucí obvodem složeným z tyčí a čelních kruhů. Průběhy gradientu napětí podél tyče jsou pro dvě polohy indukujícího pole znázorněny na následujících obrázcích 3.10 a 3.11. [15]



Obrázek 3.10: Průběhy gradientů napětí





Obrázek 3.11: Průběhy gradientů napětí

Jak je patrné z obrázku 3.10, je celkové napětí mezi body  $A_1B_1$  stejně veliké, ale opačného významu jako napětí mezi body  $A_1B_1'$ . Pokud nejsou tyto tyče vzájemně izolovány, vznikají nám dvě smyčky ( $A_1B_1B_2A_2$ ) a ( $A_1B_1'B_2'A_2$ ), kde působí dvě stejná napětí opačného smyslu. Tím vzniká v obou smyčkách proud  $i_q$ , tekoucí z tyče 1 do tyče 2 a uzavírají se přes čelní kruhy. Obdobná úvaha platí i pro obrázek 3.11, kde se smyčky proudu uzavírají jak čelními kruhy, tak železem rotoru.

Platí tedy, že u klecového rotoru se zešikmenými neizolovanými tyčemi mohou vznikat vlivem vodivosti železa proudy, které tečou tyčemi, železem a čelními kruhy, i když výsledné napětí tyče je při zešikmení tyče o vlnovou délku indukujícího pole nulové.

Z předchozí úvahy lze určit vliv délky rotoru  $l$  na velikost ztrát způsobených příčnými proudy  $i_q$ . Je-li  $r_q$  příčný odpor mezi tyčemi, pak můžeme napsat, že celkový odpor mezi tyčemi bude

$$R_q = \frac{r_q}{l}. \quad (3.60)$$

Pro podélný odpor jednotlivých tyčí pak platí

$$R_l = r_l l, \quad (3.61)$$

kde  $r_l$  je měrný odpor tyče na jednotku osové délky stroje. Z rovnic 3.60 a 3.61 plyne

$$\frac{R_q}{R_l} = \frac{r_q}{r_l} \cdot \frac{1}{l^2}, \quad (3.62)$$

z čehož plyne, že příčný odpor  $R_q$  je úměrný vztahu

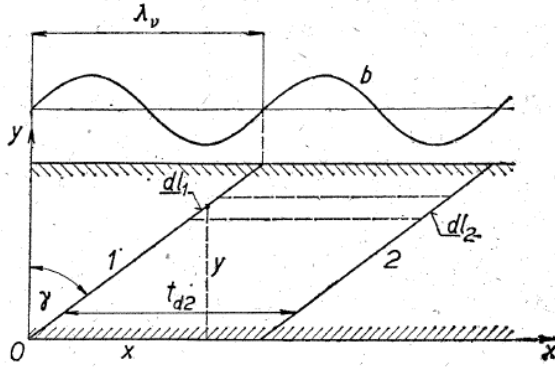
$$R_q \sim \frac{1}{l^2}. \quad (3.63)$$

S ohledem na to, že ztráty způsobené příčnými proudy  $P_{\Delta q}$  jsou přibližně úměrné vodivosti  $1/R_q$ , bude

$$P_{\Delta q} \sim \frac{1}{R_q} = l^2. \quad (3.64)$$

Z téhle úvahy tedy vyplývá, že přídatné ztráty způsobené zešikmením drážek rotoru rostou s druhou mocninou délky stroje, přičemž všechny ostatní ztráty jsou přímo úměrné délce  $l$ . Další informativní výpočet ztrát  $P_{\Delta q}$  vyvolaných příčnými proudy provedeme za pomoci následujících zjednodušujících předpokladů:

- Přechodový odpor mezi tyčí a železem je vždy větší, než impedance železa ( $r_q \gg R_{qFe}$ ), proto je přípustné impedanci železa zanedbat.
- Impedance čelních kruhů je zanedbatelná
- Impedance tyčí klece je ve směru osy stroje zanedbatelná.



Obrázek 3.12: K výpočtu přídatných ztrát vlivem zešikmení

Ztráty určené při použití předchozích předpokladů budou vždy nepatrně větší, než skutečné.

Položíme-li počátek souřadného systému do dolního konce tyče 1 (viz. obrázek: 3.12), platí pro indukované napětí v elementu  $dl_1$  tyče 1 o souřadnicích  $x, y$ , rovnice 3.58. Napětí tohoto elementu o délce  $dl_1$  proti dolnímu okraji rotoru ( $x$ ) má hodnotu

$$e_1 = Bv \int_0^y \sin(\alpha + vy \operatorname{tg} \gamma) dy = -\frac{2Bv}{v \operatorname{tg} \gamma} \sin\left(\alpha + \frac{vy \operatorname{tg} \gamma}{2}\right) \sin \frac{vy \operatorname{tg} \gamma}{2} \quad (3.65)$$

Obdobně platí pro napětí elementu  $dl_2$  o souřadnicích  $(x+t_{d2}), y$  proti ose  $x$

$$\begin{aligned} e_2 &= Bv \int_0^y \sin(\alpha + vy \operatorname{tg} \gamma + vt_{d2}) dy \\ &= -\frac{2Bv}{v \operatorname{tg} \gamma} \sin\left(\alpha + \frac{vy \operatorname{tg} \gamma}{2} + vt_{d2}\right) \sin \frac{vy \operatorname{tg} \gamma}{2} \end{aligned} \quad (3.66)$$

Rozdíl napětí mezi elementy  $dl_1$  a  $dl_2$  pak bude

$$\Delta e_{12} = \frac{4Bv}{v \operatorname{tg} \gamma} \sin \frac{vy \operatorname{tg} \gamma}{2} \sin \frac{vt_{d2}}{2} \cos\left(\alpha + \frac{vt_{d2}}{2} + \frac{vy \operatorname{tg} \gamma}{2}\right). \quad (3.67)$$

Značí-li  $r_q$  střední hodnotu přechodového odporu mezi tyčí a železem vztaženou na jednotku osové délky stroje, bude proud  $di_q$  tekoucí mezi elementy  $dl_1$  a  $dl_2$  při napětí  $\Delta e_{12}$  určen vztahem

$$di_q = \frac{\Delta e_{12}}{r_q} dy. \quad (3.68)$$

Z proudu tekoucím elementem  $di_q$  pak můžeme vypočítat ztráty v elementu způsobené tímto proudem

$$\Delta P_{\Delta q} = 2(di_q)^2 \frac{r_q}{dy}. \quad (3.69)$$

Celkové ztráty v jedné drážkové rozteči jsou po integraci

$$P_{\Delta q} = 8B^2 v^2 \frac{\sin^2 \frac{vt_{d2}}{2}}{r_q v^2 t g^2 \gamma} l. \quad (3.70)$$

Při natočení o jednu statorovou drážkovou rozteč platí  $v=Z_1$  a  $l \operatorname{tg} \gamma = t_{d1} = \pi D / Z_1$ . Pro ztráty vlivem příčných proudů platí pro tento případ

$$P_{\Delta q} = 8B^2 v^2 \frac{\sin^2 \frac{Z_1}{Z_2} \pi}{r_q (\pi D)^2} l^3. \quad (3.71)$$

Ztráty na jednotku osové délky tedy jsou

$$P'_{\Delta q} = 8B^2 v^2 \frac{\sin^2 \frac{Z_1}{Z_2} \pi}{r_q (\pi)^2} \left(\frac{l}{D}\right)^2. \quad (3.72)$$

Přídavné ztráty na jednotku osové délky stroje jsou u rotoru s kotvou nakrátko, neizolovanými tyčemi a zešíkmením o jednu statorovou drážkovou rozteč, úměrné veličině  $(l/D)^2$ .

Z provedených teoretických úvah plynou následující závěry týkající se zešíkmení tyčí:

- U strojů s polozavřenými drážkami na statoru není podle možností nutné zešíkmovat drážky na rotoru a tím pádem nemusí být izolované tyče.
- U strojů s otevřenými drážkami na statoru se doporučuje natočené drážek rotoru o jednu drážkovou statorovou rozteč a plně izolované rotorové vinutí.
- U strojů s poměrem  $D/l < 1$  je vhodné vždy použít rotor s natočenými drážkami a plně izolovanými tyčemi.
- U strojů s natočenými drážkami je vhodné volit statorové vinutí dvouvrstvé se zkráceným krokem. [15]

## 4 Metody určování přídavných ztrát

### 4.1 Točení proti poli podle p. Hellera a Hamaty

Měření přídavných ztrát je poměrně složitou záležitostí. U menších a středních strojů lze tyto ztráty určit z rozdílu příkonu a výkonu. Poměrně snadný způsob určování přídavných ztrát je metodou točení proti poli (reverse rotation test). Motor se při použití této metody připojí k jinému motoru a je s ním otáčen proti směru statorového pole. Měřený motor působí jako brzda (skluz  $s=2$ ) a napájecí napětí se sníží, aby při synchronních otáčkách odebíral jmenovitý proud. Celkové ztráty motoru jsou tedy kryty jak elektricky ze sítě, tak mechanicky poháněným motorem. Přiváděný elektrický výkon ze sítě pokrývá ztráty ve statorovém vinutí a ztráty v železe. Ztráty ve vinutí rotoru jsou při skluzu  $s=2$  rovným dílem kryty elektricky ze sítě a mechanicky hřídelí. Dále jsou mechanicky kryty ztráty mechanické a přídavné. Při zanedbání poměrně malých ztrát v železe platí pro elektrický příkon statoru vztah

$$P_{stat} = P_{Cu1} + \frac{1}{2}P_{Cu2}. \quad (4.1)$$

Pro mechanický příkon rotoru pak platí

$$P_{rot} = P_m + P_{\Delta} + \frac{1}{2}P_{Cu2}. \quad (4.2)$$

Přídavné ztráty při zatížení (při jmenovitém proudu) dostaneme

$$P_{\Delta} = P_{rot} + P_{Cu1} - P_{stat} - P_m. \quad (4.3)$$

Při použití této metody jsou magnetické poměry ve stroji jiné, než pokud by byl skluz  $s=0$ . Řada měření však prokázala, že vliv na velikost přídavných ztrát není velký.

Výhodou při měření točením proti poli je, že přídavné ztráty jsou 20 až 30% celého příkonu stroje, oproti tomu při přímém měření za normálního provozu jsou tyto ztráty jen 2 až 3 procenta příkonu. Výsledná chyba měření při použití metody točení proti poli je tedy jen velmi malá. Další výhodou točení proti poli je, že jako poháněcí motor stačí použít stroj o výkonu 15 až 20% výkonu zkoušeného stroje, což je výhodné při měření poměrně velkých strojů. [15]

### 4.2 Určování přídavných ztrát podle normy IEC 60034-2-1

#### 4.2.1 Součet ztrát- zbytková metoda

Metoda se používá pro stroje o výkonu do 2 MW. Přídavné ztráty se vypočtou jako rozdíl příkonu a součtu výkonu, ztrát ve vinutí statoru, v železe, ventilačních ztrát a ztrát v rotoru v závislosti na skluzu.

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{Fe} - P_{fw} \quad (4.4)$$

Nejistota při výpočtu ztrát se sníží za použití regresní analýzy vyobrazené na obrázku: 4.1 a samotné přídatné ztráty se vypočítají pomocí:

$$P_{Lr} = A \cdot M^2 + B \quad (4.5)$$

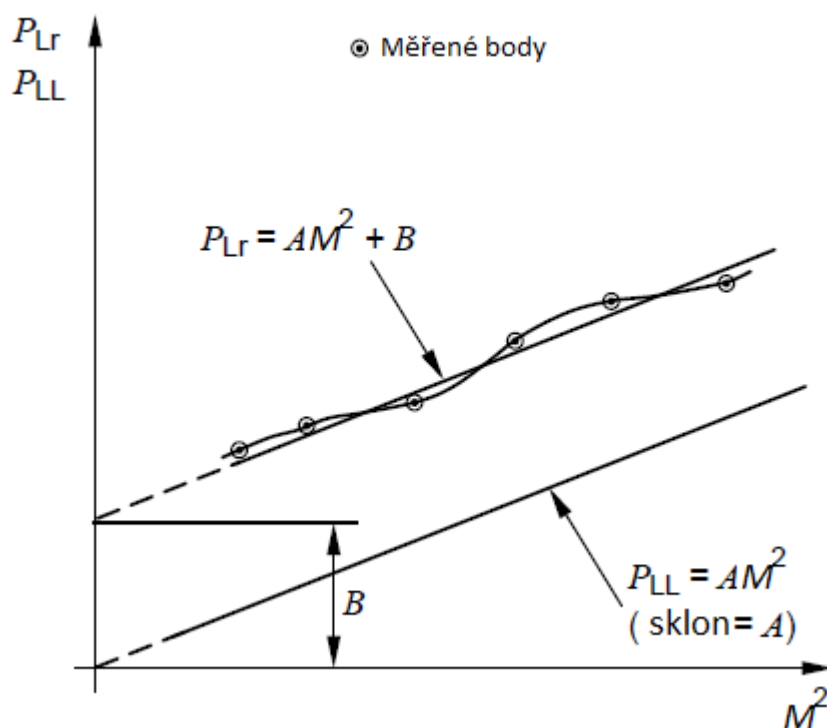
$A$  a  $B$  jsou konstanty určené z bodů měření při různé zátěži stroje.

$$A = \frac{n \cdot \sum(P_{Lr} \cdot M^2) - \sum P_{Lr} \cdot \sum M^2}{n \cdot \sum(M^2)^2 - (\sum M^2)^2} \quad (4.6)$$

$$B = \frac{\sum P_{Lr}}{n} - A \cdot \frac{\sum M^2}{n}, \quad (4.7)$$

$n$  je počet měřených bodů zátěže.

$M$  je moment zátěže



Obrázek 4.1: Závislost přídatných ztrát na druhé mocnině momentu

Korelační koeficient  $\gamma$  se vypočte podle následujícího vzorce:

$$\gamma = \frac{n \cdot \sum(P_{Lr} \cdot M^2) - \sum P_{Lr} \cdot \sum M^2}{\sqrt{(n \cdot \sum(M^2)^2 - (\sum M^2)^2) \cdot (n \cdot \sum P_{Lr}^2 - (\sum P_{Lr})^2)}} \quad (4.8)$$

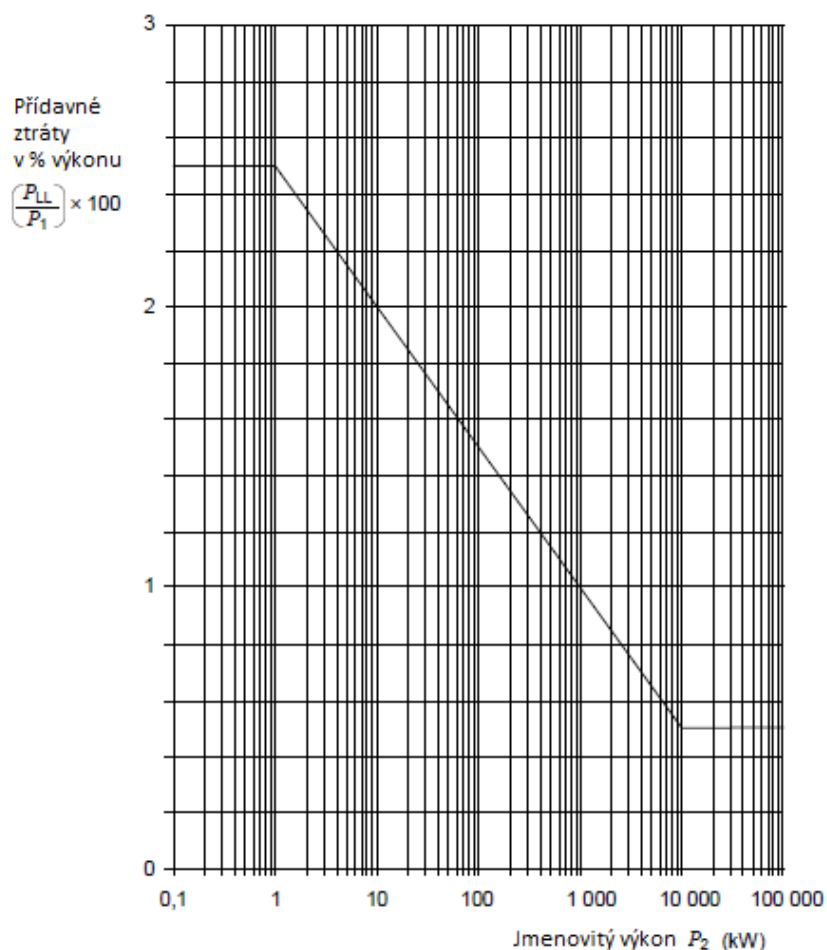
Pokud platí, že  $\gamma < 0,95$ , odstraní se nejhorší bod z měření a regrese se opakuje. Pokud bude i nadále platit  $\gamma < 0,95$ , výsledek se označí jako chybný, odstraní se chyby a výpočet se opakuje. Pokud bude proveden dostatečný počet měření, může korelační koeficient osáhnout až hodnot  $\gamma = 0,98$ .

Je-li stanovená konstanta  $A$ , můžeme přídatné ztráty při zatížení vypočítat pomocí vzorce:

$$P_{LL} = A \cdot M^2 \quad (4.9)$$

#### 4.2.2 Součet ztrát- přiřazená hodnota pro přídatné ztráty

Metoda je obdobná jako předchozí s tím rozdílem, že se používá pro stroje o výkonu větším, než 2MW. Měření ztrát na takovýchto strojích by bylo technicky a finančně velmi náročné, proto se používá při měření sníženého napětí a poté se ztráty přepočítávají na jmenovité napětí. Hodnota přídatných ztrát při zatížení se v tomhle případě počítá jako procentuální podíl z příkonu, viz. obrázek: 4.2 [18][19]



Obrázek 4.2: Odvození přídatných ztrát při zatížení

Hodnoty křivky mohou být popsány následujícími vzorci:

$$\text{Pro } P_2 \leq 1\text{kW} \quad P_{LL} = P_1 \cdot 0,025 \quad (4.10)$$

$$\text{Pro } 1\text{kW} < P_2 < 10\text{MW} \quad P_{LL} = P_1 \cdot \left[ 0,025 - 0,005 \log_{10} \left( \frac{P_2}{1\text{kW}} \right) \right] \quad (4.11)$$

$$\text{Pro } P_2 \geq 10\text{MW} \quad P_{LL} = P_1 \cdot 0,005 \quad (4.12)$$

Pro jiné, než jmenovité hodnoty výkonu se přídavné ztráty při zatížení mění s druhou mocninou proudu, od kterého se odečte druhá mocnina proudu naprázdno. [18][19]

#### 4.2.3 Součtová metoda- součet ztrát za použití metod točení proti poli a měření bez rotoru

Tahle metoda souží rovněž k určení účinnosti ze součtu dílčích ztrát, však s tím rozdílem, že přídavné ztráty se stanoví kombinací dvou různých testů. A to test s odstraněným rotorem a test pomocí točení proti poli. Během obou testů musí být stator napájen čtyřmi hodnotami proudu mezi 25-100% jmenovitého a dvěma hodnotami proudu vyššími, než 100% jmenovitého. Při napájení vyšším proudem musíme brát zřetel na možné nadměrné oteplení stroje.

Při měření pomocí metody s odstraněným rotorem musí být na stroji nainstalovány všechny komponenty, ve kterých mohou vznikat vířivé proudy, například ložiskové štíty a nosné části motoru. Všechny naměřené hodnoty se označují indexem „rm“ (Rotor removed).

Při zkoušce točením proti poli musí být stroj kompletní a je jiným strojem poháněn synchronními otáčkami proti jeho točivému magnetickému poli. Poháněcí stroj musí mít minimálně výkon, aby pokryl veškeré ztráty v měřeném stroji, však maximálně pětinašobek ztrát. Jako první se provede měření bez napětí na měřeném stroji a zapíše se hodnota příkonu poháněcího motoru  $P_{0,rr}$ . Po té se přivede napětí na stator měřeného stroje a nastaví se proud stejný jako při měření bez rotoru. Pro všechna měření se zaznamenávají hodnoty s indexem („rr“ reverse-rotation):  $I_{L,rr}$ ,  $R_{rr}$ ,  $P_{1,rr}$  pro měřený motor a  $P_{D,rr}$  pro poháněcí motor.

Vyhrazení hodnot statorových výkonů  $P_{1,rm}$  a  $P_{1,rr}$ , a výkonu na hřídeli ( $P_{D,rr} - P_{0,rr}$ ) se provede pomocí regresivní analýzy popsané výše. Takto upravené výkony budou vypadat následovně:

$$P_{1,rm} = A_{rm} \cdot I^{N1} \quad (4.13)$$

$$P_{1,rr} = A_{rr} \cdot I^{N2} \quad (4.14)$$

$$P_{D,rr} - P_{0,rr} = A_{D,rr} \cdot I^{N3} \quad (4.15)$$

Pro každou hodnotu zkušebního proudu jsou tedy přídavné ztráty při zatížení:

$$P_{LL} = P_{LL,rm} + P_{LL,rr} , \quad (4.16)$$

kde:

$$P_{LL,rm} = P_{1,rm} - (3 \cdot I^2 \cdot R_{s,rm}) \quad (4.17)$$

$$P_{LL,rr} = (P_{D,rr} - P_{0,rr}) - (P_{1,rr} - P_{LL,rm} - (3 \cdot I^2 \cdot R_{s,rr})) \quad (4.18)$$

$R_{s,rm}$  ( $R_{s,rr}$ ) je odpor jedné fáze statoru.

Přídavné ztráty při zatížení se v určitém provozním bodu vypočítají následovně:

$$P_{LL} = P_{NLL} \cdot \left( \frac{I_L}{I_{NL}} \right)^2 \quad (4.19)$$

$$I_{NL} = \sqrt{I_N^2 - I_0^2} \quad (4.20)$$

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (4.21)$$

Kde  $I_{NL}$  je jmenovitý proud statoru,  $I_0$  je proud naprázdno a  $I$  je proud při konkrétním měřeném pracovním bodě. [18][19]

$$P_{NLL} = A_{Drr} \cdot I_{NL}^{N3} + 2A_{rm} \cdot I_{NL}^{N1} - A_{rr} \cdot I_{NL}^{N2} - 6I_{NL}^2 \cdot (R_{srm} - 0,5R_{srr}) \quad (4.22)$$

#### 4.2.4 Měření přídavných ztrát pomocí Eh-star testu

Postup určení přídavných ztrát při zatížení vyžaduje napájení nesymetrickým napětím. Při použití této metody musí být motor přepojen do hvězdy (pokud tomu tak není) a střed hvězdy nesmí být spojen s nulovým vodičem. Třetí fáze motoru se připojí k napájení přes odpor  $R_{eh}$ , který má pro zapojení do hvězdy přibližně následující hodnoty:

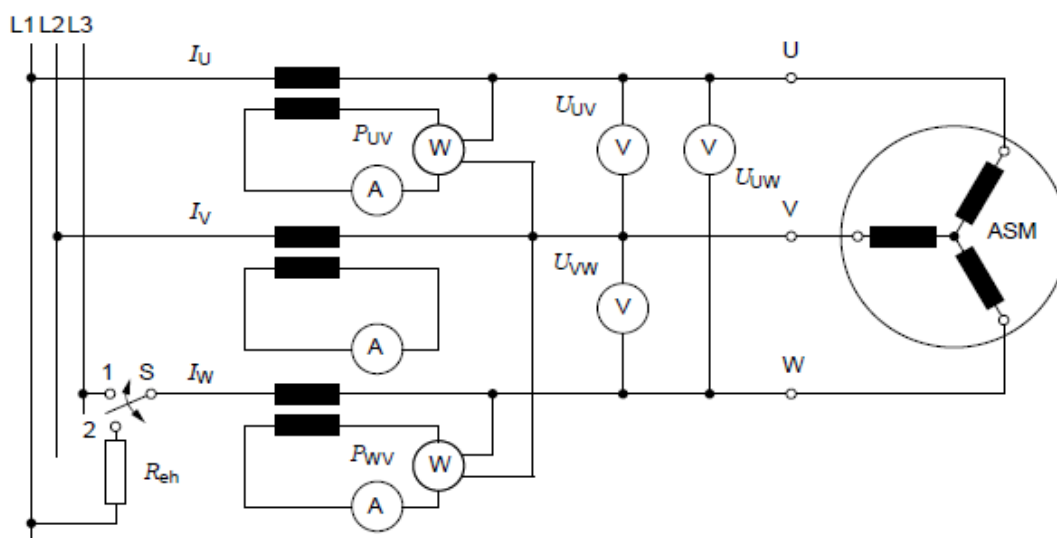
$$R'_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \cdot 0,2, \quad (4.23)$$

pro motor zapojený do trojúhelníka pak:

$$R'_{eh} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{I_N} \cdot 0,2. \quad (4.24)$$

Odpor  $R_{eh}$  se nastaví takový, aby pozitivní složka proudu  $I_1$  zůstala pod 30% negativní složky proudu  $I_2$  a otáčky zůstaly blízko jmenovitých hodnot. Doporučuje se začít odporem nepřevyšujícím hodnotu 20%  $R'_{eh}$ .





Obrázek 4.3: Zapojení pro měření metodou Eh-star test

Před započítím měření a po jeho skončení se změří odpor mezi svorkami V a W.

Aby se předešlo nadměrnému zahřívání nerovnoměrně zatížených fází, musí se zkouška provádět na studeném stroji a v co nejkratším čase.

Velké motory lze spouštět pouze při sníženém napětí (25% - 40%  $U_N$ ) a bez předřadného odporu  $R_{rh}$ . To znamená, že spínač „s“ na obrázku: 4.3 se přepne do polohy 1 a až po rozběhnutí stroje se přepne do polohy 2. Malé motory mohou mít odpor připojen i při rozběhu, v tom případě je přepínač nepotřebný.

Napájecí napětí se mění pro šest různých měřených bodů, které by měly být rovnoměrně rozloženy mezi 75% - 150% fázového proudu měřeného na prostřední fázi. Měření se provádí od nejvyšší hodnoty k nejnižší.

Aby bylo možné dosáhnout co nejpřesnějších výsledků, nesmí skluz při žádném z měření přesáhnout dvojnásobek jmenovitého skluzu.

Všechna data musí být opět vyhlazena pomocí regresivní analýzy popsané na obrázku: 4.1.

Ztráty se vyjádří jako funkce čtverce záporné části proudu  $I_{i(2)}$  v závislosti na testovacím proudu  $I_t$ .

$$P_{Lr} = A \cdot \left( \frac{I_{i(2)}}{I_t} \right)^2 + B, \quad (4.25)$$

kde:

$$I_{tD} = \frac{\sqrt{I_N^2 - I_0^2}}{\sqrt{3}} \quad (4.26)$$

$$I_{tY} = \sqrt{I_N^2 - I_0^2}$$

Hodnota A a B se vypočítá podle postupu pro regresivní analýzu. Po vypočtení hodnoty A platí pro přídavné ztráty při zatížení rovnice: [18][19]

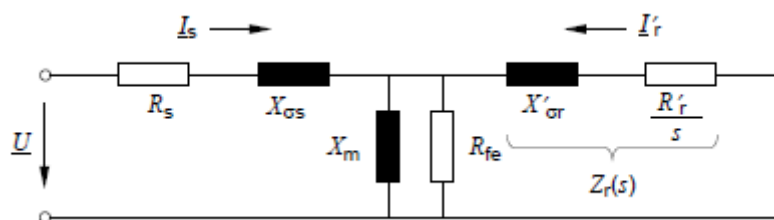
$$P_{LL} = A \cdot M^2 \quad (4.27)$$

#### 4.2.5 Stanovení účinnosti za použití náhradních parametrů

Tahle metoda se používá, pokud nejsou možné zátěžové zkoušky na motoru. Je založena na určení parametrů náhradního schématu asynchronního stroje, viz obrázek: 4.4. Veškeré parametry rotoru jsou přepočítány na hodnoty na statoru a jsou označeny apostrofem, jako například  $X'_{\sigma r}$ . Pro určení ztrát a účinnosti se aplikuje pouze měření motoru naprázdno a měření nakrátko se sníženou napájecí frekvencí.

Při měření naprázdno musí být stabilizovány hodnoty napětí a frekvence. Měření se provádí ve dvou po sobě jdoucích 30 minutových intervalech.

Při měření s redukovanou frekvencí musí být měnič kmitočtu schopen napájet stroj jmenovitým proudem až do 25% jmenovitého kmitočtu. Napájecí měnič kmitočtu by měl být schopen napájet stroj sinusovým průběhem napětí, aby byl výsledek co nejpřesnější. Měření se musí provést alespoň pro tři napájecí frekvence mezi 25% až 50% jmenovité hodnoty.



Obrázek 4.4: Náhradní schéma asynchronního motoru

Pro určení parametrů musíme znát:

$$\frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}}$$

poměr rozptylové reaktance statoru ku rozptylové reaktanci rotoru

$$a_r$$

teplotní koeficient rotorového vinutí

$$X_{\sigma s}, X_m$$

rozptylovou reaktanci statoru a magnetizační reaktanci.

Hodnota  $R'_r$  se určí z následujícího vzorce:

$$R'_r = \frac{(X_m + X'_{\sigma r})}{2\pi f \tau_0} \quad (4.28)$$

$X_m$	je magnetizační reaktance
$X'_{\sigma r}$	je rozptylová reaktance rotoru
$f$	je napájecí frekvence
$\tau_0$	je časová konstanta

Výpočet jalového výkonu pro měření naprázdno:

$$P_{Q,0} = \sqrt{(3U_0 I_0)^2 - P_0^2} \quad (4.29)$$

$U_0, I_0$  a  $P_0$  jsou fázové napětí, fázový proud a příkon naprázdno.

Jalový výkon při měření nakrátko se vypočte podle následujícího vzorce:

$$P_{Q,k} = \sqrt{(3UI)^2 - P_1^2} \quad (4.30)$$

$U, I$  a  $P_1$  jsou fázové napětí, fázový proud a příkon nakrátko

Výpočet reaktance  $X_m$  ze zkoušky na prázdko a  $X_{\sigma s,k}$  ze zkoušky nakrátko:

$$X_m = \frac{3U_0^2}{P_{\sigma,0} - 3I_0^2 X_{\sigma s}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2}$$

$$X_{\sigma s,k} = \frac{P_{Q,k}}{3I^2 \left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}} + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)} \cdot \left(\frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}} + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right) \quad (4.31)$$

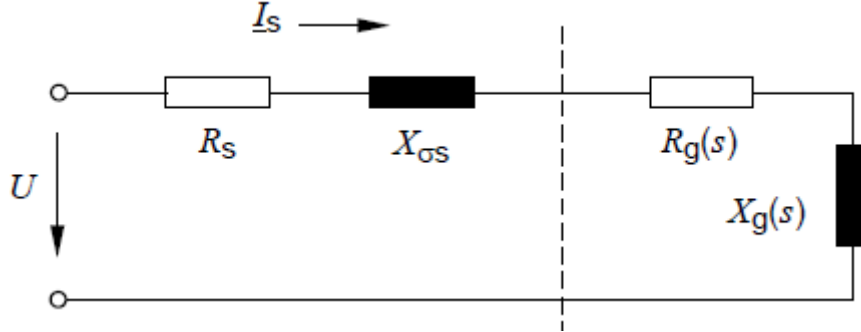
$$X_{\sigma s} = \frac{f_n}{f_k} X_{\sigma s,k} \quad X'_{\sigma r} = \frac{X_{\sigma s}}{\frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}}} \quad (4.32)$$

Výpočet příčného odporu  $R_{Fe}$  ze ztrát v železe a fázového napětí:

$$R_{Fe} = \frac{3U_N^2}{P_{Fe}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2} \quad (4.33)$$

Odpor rotoru se pro každé měření nakrátko vypočte podle následujícího vzorce:

$$R'_{r,k} = \left( \frac{P_1}{3I^2} - R_s \right) \cdot \left( 1 + \frac{X'_{\sigma r}}{X_m} \right)^2 - \left( \frac{X'_{\sigma r}}{X_{\sigma s}} \right)^2 \cdot \frac{X_{\sigma s,k}^2}{R_{Fe}} \quad (4.34)$$



Obrázek 4.5: Zjednodušené náhradní schéma pro výpočty

Pro každý zatěžovací bod se vypočítá impedance a admitance závislá na skluzu.

$$Z_r = \sqrt{\left( \frac{R'_r}{s} \right)^2 + X_{\sigma r}^2}$$

$$Y_g = \sqrt{\left( \frac{\frac{R'_r}{s}}{Z_r^2} + \frac{1}{R_{Fe}} \right)^2 + \left( \frac{X'_{\sigma r}}{Z_r^2} + \frac{1}{X_m} \right)^2}$$

$$R_g = \frac{\frac{R'_r}{s} + \frac{1}{R_{Fe}}}{Y_g^2} \quad X_g = \frac{\frac{X'_{\sigma r}}{Z_r^2} + \frac{1}{X_m}}{Y_g^2} \quad (4.35)$$

Výsledná impedance na svorkách se vypočítá:

$$R = R_s + R_g \quad X = X_{\sigma s} + X_g \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (4.36)$$

Nyní lze vypočítat proudy v motoru a z nich následně přídatné ztráty:

$$I_s = \frac{U_N}{Z} \quad \text{fázový proud statoru}$$

$$I'_r = I_s \frac{1}{Y_g Z_r} \quad \text{fázový proud rotoru} \quad (4.37)$$

$$P_{LL} = P_{LL,N} \left( \frac{I'_r}{I'_{r,N}} \right)^2 \quad (4.38)$$

$P_{LL,N}$  jmenovité přídavné ztráty vyjádřené některou z metod popsanych v kapitole výše, například metodou přiřazené hodnoty, točením proti poli a nebo Eh-star. [18][19]

### 4.3 Určování přídavných ztrát podle IEEE std 112

#### 4.3.1 Nepřímá metoda

Přídavné ztráty se určují jako zbytek ztrát po odečtení ztrát v železe, mechanických ztrát, ztrát ve vinutí statoru, v tyčích rotoru a mechanických ztrát od rozdílu příkonu a výkonu. [20]

#### 4.3.2 Přímá metoda

V případě přímé metody se postupuje se tak, že se určí složka ztrát při základní frekvenci a vysokofrekvenční složka. Součet těchto dvou složek udává celkové přídavné ztráty. [20]

##### 4.3.2.1 Přídavné ztráty při základní frekvenci.

Přídavné ztráty při zatížení pro jmenovitou frekvenci se zjistí pomocí vyváženého napájecího napětí přivedeného na stator, přičemž se odstraní rotor. Všechny ostatní komponenty, jako držáky, ložiskové štíty a podobné musí zůstat na místě z důvodu možnosti vzniku vířivých proudů. Proud potřebný pro test se vypočte pomocí rovnice: 4.39 a značí se jako  $I_t$ . Měření se provádí pro hodnoty 0,25 - 1,5 násobku jmenovitého zatížení. [20]

$$I_t = \sqrt{(I^2 - I_0^2)} \quad (4.39)$$

Kde:

$I_t$  je hodnota statorového proudu během testu

$I_0$  je proud naprázdno

$I$  je hodnota proudu, pro který se provádí test

##### 4.3.2.2 Vysokofrekvenční přídavné ztráty

Přídavné ztráty při vysokých frekvencích se určí pomocí reverzačního testu. Motor se kompletně smontuje a připojí se k jinému stroji, který s ním otáčí synchronními otáčkami proti směru točení magnetického pole v měřeném motoru. Na měřený motor se přivede takové symetrické napětí, aby ze sítě odebíral jmenovitou hodnotu proudu. V případě, že má měřený motor pouze jednosměrné chlazení, doporučuje se přepólování na svorkách, aby se při provádění testu točením proti poli otáčel ve správném směru a nebyla omezena chladicí schopnost. [20]

#### 4.3.2.3 Výpočet přídatných ztrát

Přídatné ztráty se určí součtem ztrát určených pomocí předchozích dvou metod.

$$P_{SL} = P_{SLs} + P_{SLr} \quad (4.40)$$

Kde:

$P_{SLs} = (P_s - P_{js})$ , jedná se o přídatné ztráty při základní frekvenci.

$P_{SLr} = (P_r - P_m) - (P_{rr} - P_{SLs} - P_{js})$ , jedná se o vysokofrekvenční přídatné ztráty

$P_m$  je výkon potřebný pro pohon rotoru bez přivedeného napětí na stator,

$P_r$  je výkon potřebný pro pohon rotoru s připojeným jmenovitým napětím na stator

$P_{rr}$  je příkon na statorové vinutí během testu točení proti poli

$P_s$  je příkon měřeného stroje s odstraněným rotorem,

$P_{js}$  je výkon potřebný na pokrytí ztrát ve vinutí statoru. [20]

#### 4.3.2.4 Vyhazení testovaných hodnot

Vyhazení rozpracovaných dat: ( $P_r - P_m$ ),  $P_s$ ,  $P_{rr}$  zjištěných během testů popsaných v předchozích odstavcích se provede pomocí série tří regresivních analýz. Výsledky těchto analýz jsou vyobrazeny pomocí rovnic: 4.41 až 4.43.

$$P_r - P_m = A_1(I_t)^{N_1} \quad (4.41)$$

$$P_s = A_2(I_t)^{N_2} \quad (4.42)$$

$$P_{rr} = A_3(I_t)^{N_3} \quad (4.43)$$

Kde:

$A$  je měřená hodnota (konstantní složka)

$I_t$  je síťový proud v průběhu zkoušky

$N$  je sklon křivky [20]

#### 4.3.3 Alternativní metoda pro motory s vinutým rotorem

V tomto případě se rotor motoru budí stejnosměrným proudem a svorky na statoru jsou zkratovány pomocí ampérmetrů. Měřený motor je poháněn jiným motorem synchronními otáčkami. Buzení rotoru se zvyšuje až do doby, kdy se začne indukovat proud na statorových svorkách takové hodnoty, pro kterou je požadované zjistit přídatné ztráty při zatížení.

Výkon potřebný pro pohon rotoru měřeného stroje se запиše jak pro buzený stator  $P_r$ , tak pro stator bez buzení  $P_m$ . Přídatné ztráty při zatížení se vypočítají podle následující rovnice:

$$P_{SLL} = P_r - P_m - P_{js} \quad (4.44)$$

#### 4.3.4 Metoda přiřazení hodnoty

Pokud se přídatné ztráty při zatížení na motoru neměří a zároveň je to přijatelné, hodnota přídatných ztrát se přiřadí podle následující tabulky:

*Tabulka 4-1: Přiřazená hodnota přídatných ztrát*

Jmenovitý výkon motoru [kW]	Přídatné ztráty při zatížení v % z výkonu stroje
1-90	1,8%
91-375	1,5%
376-1850	1,2%
1851 a více	0,9%

#### 4.3.5 Vstup-výstup s rozdělením ztrát (B)

Při použití téhle metody se od vstupního výkonu odečte výstupní. Přídatné ztráty se pak zjistí odečtením konvenčních ztrát (mechanické, v železe, ve vinutí statoru a rotoru) od rozdílu výkonů. Hodnoty přídatných ztrát se pro různá zatížení vynesou do grafu v závislosti na čtverci momentu a pomocí lineární regrese se křivka vyhladí a odstraní se chyby měření. Přídatné ztráty se vypočtou podle následujícího vzorce:

$$P_{Lr} = AM^2 + B \quad (4.45)$$

kde:

- $P_{Lr}$  jsou přídatné ztráty v závislosti na čtverci momentu
- $M$  je moment v  $N \cdot m^{-1}$
- $A$  udává sklon křivky
- $B$  je konstantní složka přídatných ztrát

V případě, že by byl sklon křivky negativní, nebo by byl korelační koeficient menší, než 0,9, odstraníme nejhorší bod a regresní analýzu opakujeme. Pokud se korelační koeficient zvýší nad 0,9, test je uspokojivý, pokud je tomu však naopak, test nebude vyhovovat. V tomhle případě se chyby přístrojů, nebo chyby měření zaznačí. Následovně by se měly chyby odstranit a test opakovat. Přídatné ztráty při zatížení se pak odvodí z rovnice: 4.45 jako:

$$P_{Lr} = AM^2 \quad (4.46)$$

#### 4.3.6 Duplicitní metoda (C)

Tento způsob je možný použít, jsou-li k dispozici dva stejné stroje. Oba stroje jsou spolu mechanicky spojeny a elektricky jsou připojeny ke dvěma zdrojům elektrické energie, jenž jeden z nich má nastavitelnou frekvenci a napětí. Oba zdroje musí být schopny dodat dostatečnou energii pro napájení stroje. Stroj připojený na zdroj konstantního napětí o konstantní frekvenci je označen jako *M1* a stroj připojen ke zdroji s proměnným napětím je označen jako *M2*. Přídavné ztráty při zatížení se určí nepřímou metodou.

V průběhu měření bude pohon *M1* pracovat nejprve jako motor, poté jako generátor a bude pomocí pohonu *M2* zatěžován čtyřmi zátěžnými body mezi 25% a 100% jmenovitého výkonu a poté dvěma zátěžnými body mezi 100 a 150% výkonu. V případě potřeby se přidají další měření. Pro každý zatěžovací bod se odečtou hodnoty výkonu, proudu, napětí, frekvence, teplota a odpor statorového vinutí každého stroje spolu s otáčkami a teplotou okolí. Pro každý měřený bod musí být zachován poměr  $U/f = U_n/f_n$ .

Kombinované přídavné ztráty se určí odečtením mechanických ztrát, ztrát v železe, ztrát v tyčích rotoru a ztrát ve vinutí statoru obou strojů od rozdílu příkonu a výkonu. Předpokládá se, že přídavné ztráty jsou úměrné čtverci proudu rotoru a vypočítají se podle rovnic: 4.47 a 4.48.

Stroj *M1* (jako motor)

$$P_{SL1} = \Delta P_{j2.1} \cdot \frac{P_{SL}}{\Delta P_{j2.1} + \Delta P_{j2.2}} \quad (4.47)$$

Stroj *M2* (jako generátor)

$$P_{SL2} = P_{SL} - P_{SL1} \quad (4.48)$$

Kde:

$P_{SL}$	jsou kombinované přídavné ztráty
$P_{SL1}$	jsou přídavné ztráty pro <i>M1</i>
$P_{SL2}$	jsou přídavné ztráty pro <i>M2</i>
$\Delta P_{j2.1}$ a $\Delta P_{j2.2}$	jsou ztráty v tyčích rotoru <i>M1</i> a <i>M2</i> .

Předběžná hodnota přídavných ztrát se stanoví jako průměr ze dvou hodnot vypočtených pomocí předchozích rovnic. Tato hodnota se dále vyhladí následujícím způsobem pomocí regresivní analýzy:

$$P_{SLp} = A \cdot (I_{2p})^2 + B, \quad (4.49)$$



kde:

$P_{SLp}$	je průměrná hodnota přídavných ztrát
$A$	udává sklon křivky
$I_{2p}$	je průměrná hodnota rotorového proudu
$B$	je konstantní složka přídavných ztrát (při nulovém zatížení).

Proud v rotoru  $I_2$  se vypočítá pomocí následující rovnice:

$$I_2 = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (4.50)$$

Kde:

$I$	je jmenovitý proud stroje
$I_0$	je proud naprázdno.

Dále se vyhodnocení pomocí regresivní analýzy provede jako v předchozích případech. [20]

Přídavné ztráty při zatížení se po úpravách vypočtou podle vzorce:

$$P_{SLL} = A \cdot (I_2)^2. \quad (4.51)$$

#### 4.3.7 Měření výkonu s rozdělením ztrát (E a E1)

Tato zkušební metoda měří příkon a určuje výkon odečtením jednotlivých ztrát od příkonu. Celkové ztráty jsou rovny ztrátám ve vinutí statoru a tyčích rotoru přepočtených na pracovní teplotu odporu, ztrátám v železe, mechanickým ztrátám a přídavným ztrátám při zatížení.

Hodnota přídavných ztrát se v případě testování metodou „E“ určí přímým způsobem popsaným v kapitolách: 4.3.2.3 a 4.3.2.4. V případě testování metodou „E1“ se přídavné ztráty při zatížení určí způsobem podle kapitoly: 4.3.3. [20]

#### 4.3.8 Měření účinnosti pomocí náhradního schématu motoru (F a F1)

Pokud není možné provádět testování ztrát zátěžovými zkouškami motoru, provozní charakteristiky se určí na základě náhradního schématu motoru. Parametry obvodu jsou stanoveny na základě zkoušky impedance a měření naprázdno. Přesnost určení parametrů závisí primárně na určení přesné hodnoty odporu rotoru  $R_2$ , ale také na přesnosti určení hodnoty  $X_2$ , která reprezentuje rozptylovou reaktanci rotoru. Proto je důležité tyto hodnoty určit co nejpečlivěji.

Přídavné ztráty při zatížení se určí v případě testu „F“ podle kapitol: 4.3.2.3 a 4.3.2.4 a v případě testu „F1“ podle kapitoly 4.3.3. [20]

#### 4.3.9 Měření účinnosti pomocí náhradního schématu motoru kalibrovaného pro jeden bod zatížení (C/F, E/F, E1/F1)

Pro způsob C/F se přídavné ztráty při zatížení určí následovně:

- Pro motorický i generátorický režim se stanoví průměrná hodnota přídavných ztrát při zatížení  $P_{SLavg}$  podle postupu 4.3.6.
- Průměrná hodnota rotorového proudu pro oba pracovní režimy se stanoví podle rovnice: 4.50.
- Hodnota přídavných ztrát při zatížení pro jeden konkrétní zátěžový bod se stanoví podle následující rovnice:

$$P_{SL} = P_{SLavg} \left( \frac{I_2}{I_{avg}} \right)^2 \quad (4.52)$$

V případě testu „E/F“ se přídavné ztráty při zatížení určí podle kapitol: 4.3.2, nebo podle kapitoly 4.3.3 a v případě testu „E1/F1“ podle kapitoly 4.3.4. [20]

#### 4.4 Porovnání IEEE 112 a IEC 60034-2-1

IEEE 112 je standard používaný ve Spojených státech, ale vychází z něj spousta norem jiných států, jako například Kanada se standardem C390-93. Norma IEC 60034-2-1 je používána převážně v Evropě a vznikla teprve v roce 2007. IEC 60034-2-1 se přesností při určování účinnosti podobá IEEE 112 a nahradila předchozí normu IEC 60034-2, která byla velice nepřesná v důsledku malého počtu dat potřebných k určení přídavných ztrát.

Přídavné ztráty při zatížení obě normy řeší podobnými způsoby pomocí zbytkové metody, kdy se od celkových ztrát odečtou ztráty v železe, mechanické ztráty, ztráty ve vinutí statoru a ztráty v tyčích rotoru. Následně se hodnota ztrát vyhladí pomocí regresivní analýzy. Menší rozdíl je v určení korelačního koeficientu, který je 0,9 pro IEEE a 0,95 pro IEC.

Přídavné ztráty při zatížení nejdou určit přímou metodou, ale mohou být odhadnuty za použití určité tolerance a to buď jako funkce příkonu (IEC), nebo jako funkce výkonu (IEEE).

Nejistota při určování účinnosti se skládá ze tří komponentů:

$$\varepsilon = \varepsilon_j + \varepsilon_m + \varepsilon_n \quad (4.53)$$

$\varepsilon$	celková chyba
$\varepsilon_j$	chyba přístroje
$\varepsilon_m$	chyba metody
$\varepsilon_h$	chyba lidského faktoru

První dvě chyby, chyba přístroje a chyba metodiky testování jsou definovány standardy, chyba lidského faktoru se odvíjí od interpretace standardů, způsobu vedení testu a vyhodnocení výsledků.

Dle předchozích úvah se vypočte účinnost následovně:

$$\eta = \frac{P_2 \cdot (1 \pm e_1 \pm e_2 \pm \dots \pm e_m)}{P_1 \cdot (1 \pm e_a \pm e_b \pm \dots \pm e_n)} \quad (4.54)$$

Kde  $e_1, e_2, \dots, e_m$ , jsou procentuální chyby spojeny s měřením výkonu a  $e_a, e_b, \dots, e_n$  jsou spojeny s příkonem. Dříve se používalo při výpočtech maximální možné chyby a maximální nejistoty, což mělo za následek výslednou chybu, která je ve skutečnosti mnohem menší.

V dnešní době se pro určení chyby však používá metody zvané RPBE (reálný odhad odchylky). Tato metoda zvažuje při výpočtu rozdílné vlivy různých faktorů na každé měření a vyjadřuje hlavní příčinu nepřesnosti s ohledem na přesnost přístroje v proměnných specifických podle standardu.

Oba dva standardy jsou v některých přístupech shodné a v některých se liší. Například se liší v určování ztrát v železe, statorovém vinutí a přídavných ztrát. V určování ztrát v rotoru a mechanických se shodují. Odlišnosti v určování ztrát ve vinutí rotoru jsou zanedbatelné, neboť jsou v toleranci. Hodnoty účinností jsou pro oba standardy přibližně stejné, neboť i celkové ztráty nevykazují velké rozdíly. [18][19][20][21]

## 5 Návrhy pro snížení přídatných ztrát

### 5.1 Parametry vybraného vzorku asynchronního motoru

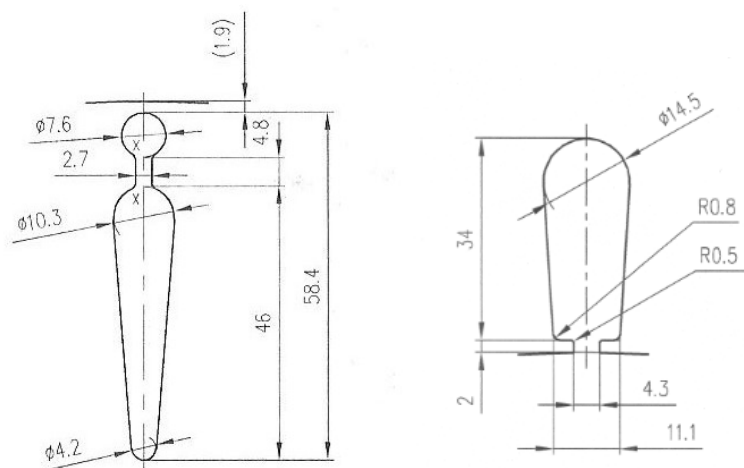
Jedná se o asynchronní motor s kotvou nakrátko o osové výšce 315mm.

Tabulka 5-1: Štítkové hodnoty vybraného vzorku motoru

Typ: 1LE1 543-3AB53-4AB0		
veličina	hodnota	jednotka
$P_n$	200	kW
$U_n$	400	V;D
$I_n$	340	A
$n$	1488	ot/min
$\eta$	96	%
$\cos \varphi$	0,88	-

Délka železa stroje je 510mm, vnější průměr statoru činí 490mm a vnitřní průměr 330mm. Vzduchová mezera mezi rotorem a statorem je 1,3mm, z čehož plyne průměr rotoru 327,4mm. Rotorové drážky jsou šípovitě zešíkmeny s kruhem nakrátko uprostřed délky svazku a se sklonem 10,5mm na polovině jeho délky, což je přibližně celá drážková rozteč statoru a uprostřed rotoru je vložen 8mm zkratovací kruh. Vinutí rotoru je nahrazeno odlévanou hliníkovou klecí o 40 tyčích.

Statorové vinutí je vloženo ve 48 drážkách po obvodu a skládá se z měděných vodičů, kterých je použito 15 pro každou cívku. Vinutí je tvořeno jako dvouvrstvé a vždy jsou použity 4 drážky na pól a fázi.



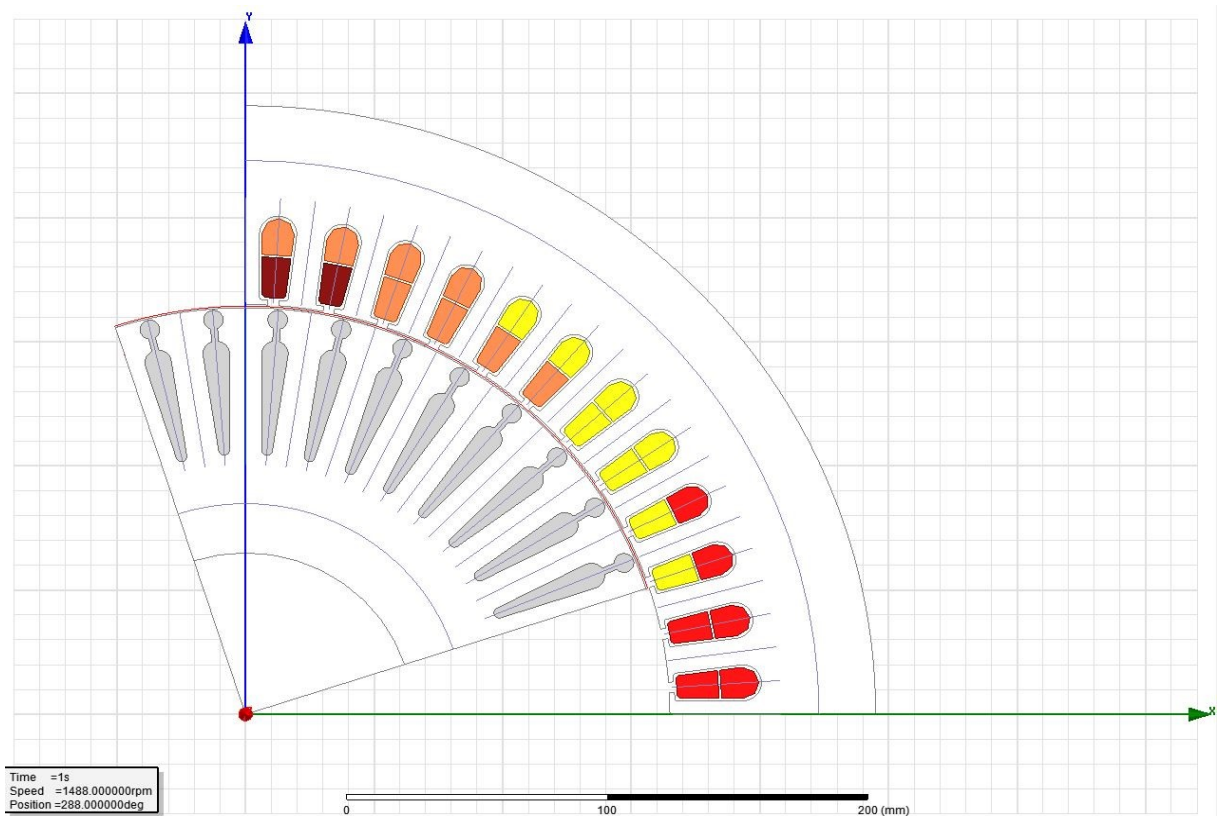
Obrázek 5.1: Rozměrový náčrtek rotorové (vlevo) a statorové (vpravo) drážky

## 5.2 Vytvoření 2D modelu v programu ANSYS Maxwell

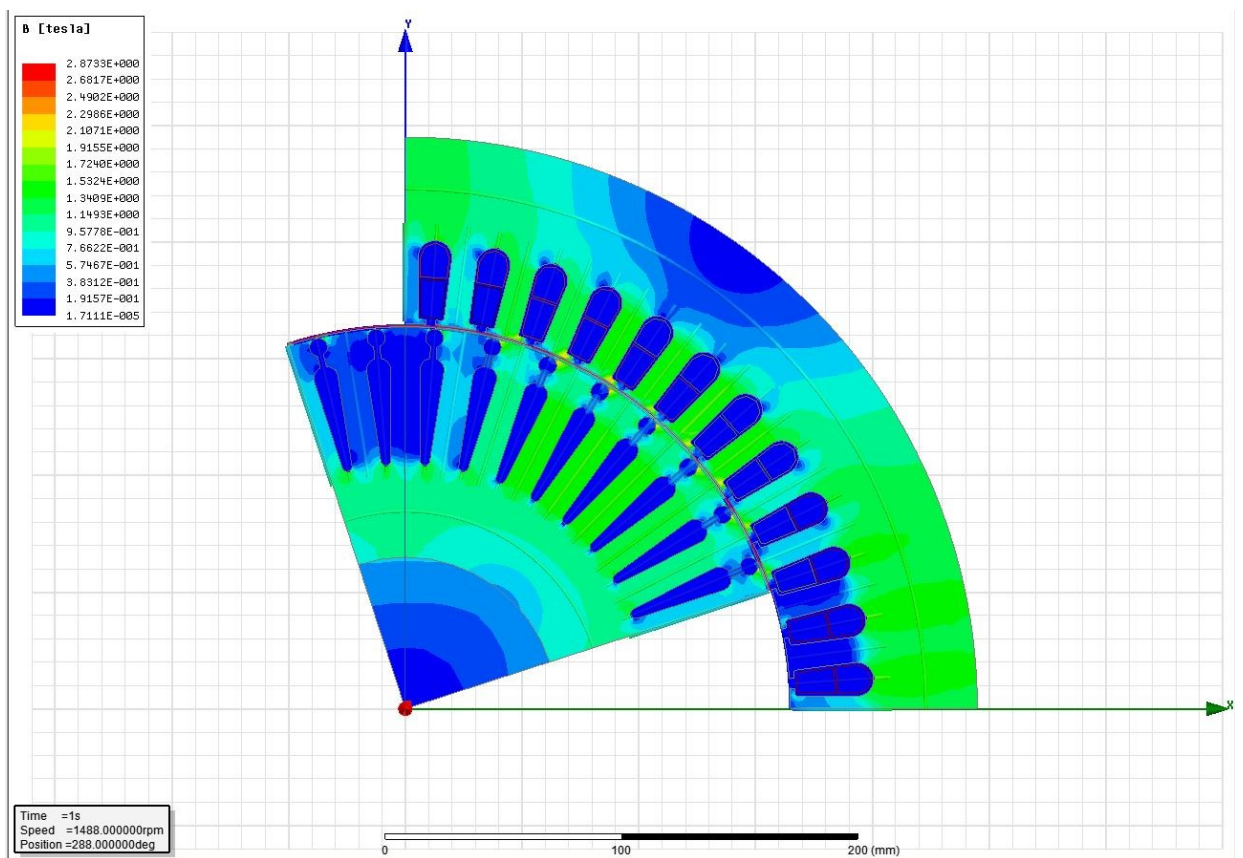
Tabulka 5-2: Vstupní data

Vstupní data		
Název	hodnota	jednotka
$U_n$	400	V
$f$	50	Hz
$n$	1488	ot/min
$2p$	4	-
$l_{Fe}$	510	mm
$R_1$	0,022767	$\Omega$
$L_1$	0,151693	mH
$R_2$	0,56901	$\mu\Omega$
$L_2$	12,917	nH

Program ANSYS Maxwell je ve 2D modelu schopen počítat přídatné ztráty pouze v případě, že by do jádra programu byly vloženy vzorce pro určení přídatných ztrát a samotný výpočet by byl proveden numericky. Modul RMXprt, který je součástí programu ANSYS Maxwell počítá přídatné ztráty na základě koeficientu určeného normou, který se zadává jako vstupní hodnota pro výpočet. Numerické výpočty s uspokojivou přesností dokáže provádět i program SIMOCALC, který bude dále používán pro výpočty, především kvůli mnohonásobně kratší době výpočtu. Modely v programech SIMOCALC, ANSYS Maxwell a protokol z měření motoru ze zkušebny byly vzájemně porovnány a odladěny tak, aby bylo možné prohlásit, že se ve všech třech případech jedná o totožný motor. Největší odchylka vypočtených a naměřených hodnot je právě v určení přídatných ztrát, a to právě kvůli obtížnosti výpočtu a nepřesnosti dosud známých vzorců. Pro určení vlivu úprav motoru na přídatné ztráty je to však dostačující a přesnou hodnotu přídatných ztrát lze určit po úpravě motoru a změření na zkušebně.



Obrázek 5.2: 2D model zkoumaného motoru



Obrázek 5.3: Magnetické sycení v zubech

Tabulka 5-3: Porovnání ztrát zjištěných různým způsobem

<div style="text-align: center;">Způsob zjištění Druh ztrát</div>	Měření	Maxwell	Numerický výpočet
ve statoru [W]	1639	1574	1636
v rotoru [W]	2712	2723	2656
v železe [W]	2055	2051	2055
mechanické [W]	506	506	506
dodatečné [W]	1993	(2000)	1792
celkové [W]	8798	8854	8645

### 5.3 Vliv poměru drážek rotoru a statoru na přídavné ztráty

Aby se zabránilo synchronním a asynchronním momentům a tím i přídavným pulzačním ztrátám, musí být co nejpečlivěji zvolen poměr mezi drážkami statoru a rotoru. Obecně se doporučuje, poměr drážek:

$$Q_r < 1,25Q_s \quad (5.1)$$

Dále pro omezení synchronních momentů třífázového stroje, pokud je rotor v klidu, musí být splněna podmínka:

$$Q_r \neq 6gp \quad (5.2)$$

kde:

p je počet pólů stroje

g je celé kladné číslo

Pokud se rotor otáčí, zabrání se synchronním momentům při dodržení podmínky:

$$Q_r \neq 6gp \pm 2p \quad (5.3)$$

Znaménko plus platí pro kladné otáčky a znaménko minus pro záporné.

Pro zabránění nebezpečným drážkovým harmonickým musí být dodrženy nerovnosti [17]:

$$\begin{aligned} Q_r &\neq Q_s \pm 2p \\ Q_r &\neq 2Q_s \pm 2p \\ Q_r &\neq Q_s \pm p \\ Q_r &\neq \frac{Q_s}{2} \pm p \end{aligned} \quad (5.4)$$

Tabulka 5-4: Možnosti kombinací drážek rotoru a statoru v případě rovných drážek

Počet drážek statoru $Q_s$	Počet drážek rotoru $Q_r$										
	Desítky	jednotky									
24		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	-	X	0	X	+	X	+	X		X
	2	-	X	-	X	0	X	+	X	+	X
	3		X	-	X		X	0	X		X
36	1		X	0	X		X	$\pm$	X	0	X
	2	$\pm$	X		X	0	X		X	+	X
	3		X	-	X	-	X	0	X	+	X
	4	+	X		X	-	X		X	0	X
	5		X	+	X		X	-	X		X
48	1		X	0	X		X	+	X		X
	2	-	X	-	X	0	X	+	X	+	X
	3		X	-	X		X	0	X		X
	4	+	X		X	-	X	-	X	0	X
	5	+	X	+	X		X	-	X		X
	6	0	X		X	+	X		X	-	X

Podle tabulky 5-4 [17] jsou přípustné pouze kombinace, které nejsou označeny žádným symbolem. V případě kombinací označených symbolem: -, podléhá motor v brzděném režimu harmonickým parazitním momentům, pokud jsou označeny: +, mohou se vyskytovat harmonické parazitní momenty v případě kladných otáček, symbolem: X, jsou označeny případy, kdy se v motoru vyskytují velké vibrace a 0, jsou označeny případy, kdy se v motoru vyskytují synchronní harmonické momenty. [17]

Předchozí úvahu lze použít v případě rovných rotorových tyčí, mnou zkoumaný motor má šípovitě zešíkmené rotorové tyče o polovinu drážkové rozteče na polovině délky a navíc je uprostřed rotoru umístěn zkratovací kruh, což má za následek vznik dvou sériových klecí. Na základě těchto poznatků budou prováděny výpočty jako pro rovné tyče, neboť v literatuře [17] autor uvádí vztahy pro zešíkmení o  $1 \div 2$  drážkové rozteče na délku rotoru, nebo pro rovné tyče a motor se svými vlastnostmi spíše blíží motoru s rovnými tyčemi.

Sériově vyráběný motor 1LE1 543-3AB53-4AB0 má 48 drážek na statoru a 40 na rotoru, což podle tabulky: Tabulka 5-4: Možnosti kombinací drážek rotoru a statoru v případě rovných drážek má za následek harmonické parazitní momenty, které taktéž způsobují přídavné ztráty. Jako nejlepší možná varianta úpravy bylo zvýšit počet drážek na rotoru na 42. Aby při větším počtu drážek nedocházelo k přesycení železa mezi drážkami rotoru, byla provedena i úprava rozměru drážky, a to šířka horní části byla zmenšena na 10mm místo původních 10,3mm. Však při původním rozměru drážky bylo nasycení mezi drážkami vyšší pouze o 2,3%, než původní, tudíž může být ponechán původní rozměr z důvodu menšího zásahu do výrobního procesu. Parametry ovlivněné změnou počtu drážek rotoru jsou uvedeny v následující tabulce:



Tabulka 5-5: Porovnání veličin ovlivněných změnou počtu drážek rotoru

	Původní	nově	nově
Veličina ovlivněná úpravou	Qr=40	Qr=42	Qr=42 (zúžení drážky)
Účinnost [%]	95,865	96,043	96,035
Účinník [-]	0,8744	0,874	0,8752
Přídavné ztráty [W]	1792	1468	1465
Ztráty ve vinutí rotoru [W]	1636	1567	1591
Mag. syc. mezi drážkami [T]	1,63	1,67	1,64
$M_k/M_n$ [-]	2,56	2,6	2,62
$M_{max}/M_n$ [-]	2,86	2,96	2,95
$I_k/I_n$ [-]	7,86	8,1	8,12

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že zvýšení počtu drážek na rotoru na 42 má pozitivní vliv na celkovou účinnost stroje. Výrobce garantuje účinnost 96 %, původní vypočtená v programu SIMOCALC byla 95,865 % a měřená účinnost na zkušebně byla 95,7 %. Po úpravě počtu drážek se výpočtová účinnost zvýšila na 96,043 % a při následném zúžení rotorové drážky, s cílem snížit magnetického sycení mezi drážkami rotoru, byla výpočtová účinnost 96,035 %. Přídavné ztráty se snížily v obou případech přibližně o 320W, což je zlepšení o 17,8%. Přidáním dvou drážek do rotoru se také zvýšil celkový průřez rotorového vinutí a tím se snížily ztráty v rotoru přibližně o 4%. Negativní vliv má zvýšení počtu rotorových drážek na poměr  $I_k/I_n$ , dle tolerance podle ČSN EN 60034-2-1 je výsledná hodnota však ještě přijatelná. Výrobce motoru garantuje poměr  $I_k/I_n=7,4$ . Další negativní vliv je zásah do série vyráběných rotorových plechů, změna počtu drážek by znamenala i změnu raznice lisu a vyžadovala by provést úpravu drážek pro celou řadu motorů, nebo minimálně pro jednu osovou výšku.

#### 5.4 Vliv otevření statorové drážky a vzduchové mezery na přídavné ztráty

Podle kapitoly 3.4.1, 3.4.2 a dále podle literatury [13] jsou na poměru otevření statorové drážky ku vzduchové mezeře závislé povrchové ztráty naprázdno a pulzační ztráty na prázdno.

Obecně platí, že čím je menší vzduchová mezera a větší otevření statorové drážky, tím je větší koeficient ovlivňující povrchové a pulzační ztráty. Velikost otevření statorové drážky je limitována průřezem vodičů, které jsou do drážky vkládány. Zvětšování vzduchové mezery má negativní vliv na účinník stroje. V následující tabulce je uveden vliv velikosti vzduchové mezery a otevření statorové drážky na parametry stroje.

Tabulka 5-6: Vliv vzduchové mezery a otevření statorové drážky na parametry stroje

Veličina ovlivněná úpravou	Původní	a	b	c	d	e	f
Účinnost [%]	95,865	95,967	96,056	96,108	95,954	96,059	96,132
Účíník [-]	0,8744	0,8675	0,8605	0,8532	0,8759	0,8692	0,8624
Přídavné ztráty celkem [W]	1792	1549	1354	1228	1757	1517	1326
Povrchové ztráty [W]	725	614	526	475	805	680	582
Pulzační ztráty [W]	915	781	671	610	798	681	586
Ztráty v železe [W]	2055	2018	1987	1918	1903	1879	1861
Jmenovitý proud [A]	342	344	347	350	341	343	346
Mk/Mn [-]	2,56	2,67	2,78	2,81	2,29	2,39	2,49
Mmax/Mn [-]	2,86	2,91	2,96	2,94	2,74	2,8	2,85
Ik/In [-]	7,86	7,96	8,05	8,02	7,44	7,56	7,65

Tabulka 5-7: Přiřazení hodnot sloupců v tabulce 5-6

Sloupec	Přiřazení hodnot
původní rozměry	otevření statorové drážky= 4,3mm, vzduchová mezera= 1,3mm
a	vzduchová mezera= 1,4mm
b	vzduchová mezera= 1,5mm
c	vzduch mezera= 1,6mm
d	otevření statorové drážky= 3mm
e	otevření statorové drážky= 3mm, vzduchová mezera= 1,4mm
f	otevření statorové drážky= 3mm, vzduchová mezera= 1,5mm

Na základě teoretických úvah praktikovaných při výpočtu v programu SIMOCALC, jejichž výsledky jsou zobrazeny v tabulce 5-6, lze stanovit, že výsledky odpovídají teoretickým předpokladům. Se zvětšující se vzduchovou mezerou se zvedá účinnost celého stroje díky snižování přídavných ztrát, zejména pulzačních a povrchových, ale bohužel zároveň dochází k poklesu účíníku. Při zužování otevření statorové drážky podle sloupce „d“ (viz. tabulka 5-6), došlo ke zvýšení účinnosti, ale z důvodu snížení ztrát v železe. Na přídavné ztráty nemá zúžení drážky o 1,3mm příliš velký vliv. Více zúžit drážku statoru již není možné z důvodu nevyrobitelnosti motoru, jelikož by byl problém vložit vinutí do drážky. Jako jedna z možností čím nahradit úplné uzavření statorové drážky je použití magneticky vodivých klínů, čímž by se zcela jistě snížily i pulzační a povrchové ztráty.

Při porovnání variant úprav vzduchové mezery a otevření statorové drážky se jako nejlepší možná varianta jeví sloupec „e“ kdy byla zvětšena vzduchová mezera o 0,1mm na 1,4mm a současně se zúžilo otevření statorové drážky na 3mm.

## 5.5 Další parametry ovlivňující přídavné ztráty

Jako další možný způsob snižování přídavných ztrát bylo zkoumání různých kombinací popsanych v kapitolách 5.2 a 5.3.

Ze sloupců „g“ a „h“ je zřejmé, že kombinací 42 drážek na rotoru a zvětšení vzduchové mezery docílíme ještě vyšší účinnosti, než v případě, když se pouze měnila velikost vzduchové mezery (viz. tabulka 5-6), ale účinník klesne jen nepatrně. Ve sloupcích „ch“ a „i“ je k předchozím dvěma případům, přidáno ještě zúžení statorové drážky na 3mm, čímž bylo docíleno zvýšení účinnosti pokaždé přibližně o 0,1% a také k mírnému zlepšení účinníku. Ve sloupci „j“ jsou vypsány hodnoty zjištěné při změně plechů rotoru a statoru za kvalitnější. Konkrétně podle katalogu plech M530-50A za M330-50A. Plech M330-50A má užší statickou hysterezní smyčku, než plech M530-50A. Změna plechu má jen nepatrný vliv na přídavné ztráty podle výpočtu v SIMOCALCU, ale ztráty v železe se sníží o 26%, což má pozitivní vliv na celkovou účinnost stroje, proto je zde i tahle varianta zmíněna. Následně ve sloupci „k“ je zobrazena varianta, když se u kvalitnějších plechů provedlo zvýšení počtu drážek na rotoru a tím bylo docíleno účinnosti 96,356%, což je důsledek snížení ztrát v železe vlivem změny plechů a snížení přídavných ztrát vlivem změny počtu drážek.

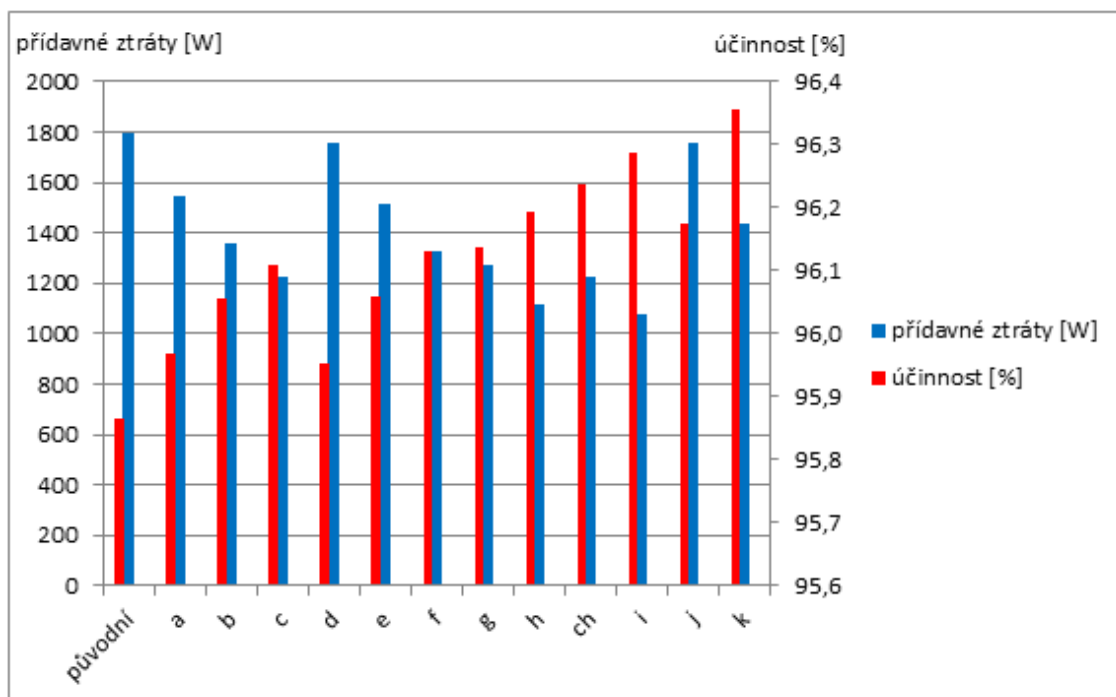
Tabulka 5-8: Změny ovlivňující parametry stroje

Veličina ovlivněná úpravou	Původní	g	h	ch	i	j	k
Účinnost [%]	95,865	96,136	96,193	96,238	96,287	96,173	96,356
Účinník [-]	0,8744	0,8670	0,8598	0,8689	0,8619	0,8732	0,8727
Přídavné ztráty celkem [W]	1792	1271	1114	1228	1077	1756	1438
Povrchové ztráty [W]	725	563	483	624	535	710	649
Pulzační ztráty [W]	915	566	487	461	396	895	650
Ztráty v železe [W]	2055	2022	1991	1877	1859	1510	1515
Jmenovitý proud [A]	342	344	347	343	346	341	341
Mk/Mn [-]	2,56	2,72	2,82	2,43	2,53	2,56	2,6
Mmax/Mn [-]	2,86	3,01	3,06	2,89	2,84	2,85	2,95
Ik/In [-]	7,86	8,22	8,3	7,8	7,89	7,9	8,16

Tabulka 5-9: Přiřazení hodnot sloupcům v tabulce 5-8

Sloupec	přiřazení hodnot
původní rozměry	otevření drážky= 4,3mm, vzduchová mezera 1,3mm
g	Vzduchová mezera= 1,4mm, počet drážek na rotoru: 42
h	Vzduchová mezera= 1,5mm, počet drážek na rotoru: 42
ch	Vzduchová mezera= 1,4mm, počet drážek na rotoru: 42, otevření statorové drážky= 3mm
i	Vzduchová mezera 1,5mm, počet drážek na rotoru: 42, otevření statorové drážky= 3mm
j	Výměna plechů rotoru a statoru za kvalitnější.
k	Výměna plechů za kvalitnější, počet drážek na rotoru: 42

## 5.6 Závěrečné zhodnocení



Obrázek 5.4: Porovnání vlivu změn parametrů stroje na účinnost a přídavné ztráty

Na obrázku 5.4 je vyobrazen vliv jednotlivých úprav motoru na jeho účinnost a přídavné ztráty. Přiřazení hodnot sloupců je podle tabulek 5-7 a 5-9.

Nejprve je porovnáván vliv velikosti vzduchové mezery, kdy ve sloupcích „a“, „b“ a „c“ se zvětšující se vzduchovou mezerou roste účinnost stroje vlivem klesajících přídavných ztrát. Tohle má však nepříznivý vliv na účinník stroje, který naopak klesá se zvětšující se vzduchovou mezerou.

Ve sloupci „d“ je vyobrazen vliv zúžení otevření statorové drážky ze 4,3mm na 3mm. Tohle má za následek nepatrné snížení celkových přídavných ztrát a zvýšení účinnosti. Účinník se též nepatrně zvýší, ale pulzační ztráty se tím zvednou. Při ponechání zúženého otevření statorové drážky a zvětšování vzduchové mezery se dle předpokladu zvedá účinnost a snižují se přídavné ztráty, účinník mírně klesá.

V případě přiklonění se k variantě popsané v kapitole 5.2, vlivem zvýšení počtu drážek rotoru klesnou přídavné ztráty. Zároveň klesnou ztráty v tyčích rotoru, z důvodu zvýšení celkového průřezu rotorových tyčí, což má opět za následek zvýšení účinnosti. Účinník se v tomto případě téměř nezmění. Při kombinaci zvýšení počtu drážek rotoru a zvětšování vzduchové mezery opět dochází ke zvyšování účinnosti, při zachování kombinace úprav a zmenšení otevření drážky statoru účinnost stále roste. Ve všech případech kombinací úprav však klesá účinník úměrně zvyšující se účinnosti.

V poslední variantě jsem zkoušel použít plechy s užší B-H charakteristikou, což taktéž vedlo ke zlepšení účinnosti. Dle předpokladů však nikoli v důsledku snížení přídavných ztrát, ale v důsledku snížení ztrát v železe. Přídavné ztráty klesly jen nepatrně.

## Závěr

Cílem této práce bylo popsat přídavné ztráty v asynchronním motoru s kotvou nakrátko, na základě výpočtů navrhnout možnosti jejich snížení a tím také zvýšení celkové účinnosti stroje. Jelikož je daná problematika velmi rozsáhlá a především je velmi obtížné přídavné ztráty určit, znamenalo to nastudovat množství české, i zahraniční literatury.

Celou práci jsem rozdělil do pěti základních kapitol. V první a druhé kapitole jsem nastínil okrajově princip funkce asynchronního motoru a třídy účinnosti. Následně ve třetí kapitole jsou již probírány jednotlivé druhy ztrát v asynchronním motoru s podrobnějším rozбором přídavných ztrát. Čtvrtá kapitola obsahuje porovnání přístupu IEC 60034-2-1 a IEEE std112 k určování právě přídavných ztrát a také účinnosti. V kapitole číslo 5 je nejprve seznámení s elektrickými a geometrickými parametry stroje. Následně byl vytvořen 2D model podle zadaných parametrů sériově vyráběného motoru 1LE1 543-3AB53-4AB0 a naladěn tak, aby hodnoty elektrických veličin vypočtené programem ANSYS Maxwell byly shodné s vypočtenými hodnotami v programu SIMOCALC a s hodnotami na protokolu z certifikované zkušebny. Po naladění motoru, kdy se hodnoty ve všech třech předchozích případech shodovaly, byly na základě teoretických úvah prováděny geometrické úpravy. Výsledky byly vyhodnoceny v kapitolách 5.2, 5.3 a 5.4.

Jako první úprava byla provedena optimalizace poměru počtu drážek na statoru a rotoru. Původní poměr byl 48:40, což podle literatury [17] může mít za následek vznik parazitních momentů a tím i přídavné ztráty vlivem vyšších harmonických. Podle literatury se jako nejlepší možná kombinace jevila 48:42, což mělo za následek nejen snížení přídavných ztrát, ale také snížení omických ztrát v tyčích rotoru, protože došlo ke zvýšení celkového průřezu klece rotoru. Při zvýšení počtu drážek na rotoru nemuselo dojít k úpravám jejich rozměru, protože při rozložení po obvodu rotoru stroje nedocházelo k přesycení v zubech mezi drážkami. Jako druhá varianta úprav bylo sledování vlivu velikosti vzduchové mezery na přídavné ztráty. Nastavená velikost vzduchové mezery výrobcem je 1,3mm, což má za následek velké povrchové a pulzační ztráty vlivem těsného mihání se zubů statoru a rotoru. V mé práci byla zkoumána vzduchová mezera od 1,3 do 1,6mm. Z výsledků je patrné, že se zvětšující se velikostí vzduchové mezery klesají přídavné ztráty, zvyšuje se celková účinnost a zároveň roste záběrný a maximální moment stroje. Úměrně s rostoucí účinností také bohužel klesá účinník a zvyšuje se záběrný a jmenovitý proud. Na přídavné ztráty má také vliv otevření statorové drážky. Konkrétně se zmenšujícím se otevřením statorové drážky klesají pulzační ztráty. Na povrchové ztráty tahle úprava má negativní vliv. Zmenšit otevření drážky pod 3mm SIMOCALC neumožňoval, pravděpodobně z důvodu, že v praxi by tím bylo znemožněno vkládání svazků vinutí do drážek. Úplné uzavření drážky a tím maximální eliminace přídavných ztrát by šlo v praxi dosáhnout vložím magneticky vodivého klínu do drážky. Což opět program SIMOCALC neumožňoval simulovat. Dále je v tabulce 5-8, ve sloupcích „j“ a „k“, popsán vliv změny plechů rotoru a statoru za plechy kvalitnější (užší B-H charakteristika). Tohle má však jen nepatrný pozitivní vliv na přídavné ztráty, ale účinnost se i přes to významně zvýší vlivem snížení ztrát v železe. Následně jsou v tabulkách 5-6 a 5-8 řešeny kombinace jednotlivých úprav a jejich vliv na přídavné ztráty. Všechny úpravy vedly ke zvýšení účinnosti stroje, zároveň také ke zhoršování účinníku. Jako jediný případ, kdy se zvýšila účinnost vlivem snížení přídavných

ztrát a zároveň vzrostl mírně i účinník byla sloupec „e“ v tabulce 5-6, kde bylo provedeno zúžení otevření drážky statoru a zvětšení vzduchové mezery o 0,1mm. Tato úprava má však negativní vliv na momentovou charakteristiku, zejména na  $M_k$ . Oproti tomu se snižujícím se záběrným momentem klesá i záběrný proud stroje.

Celkově nejvyšší účinnosti vlivem snížení přídavných ztrát bylo dosaženo při opatření podle sloupce „i“ v tabulce 5-8, kde byla upravena vzduchová mezera na 1,5mm, otevření drážky statoru na 3mm a počet drážek rotoru byl změněn na 42. Tyto změny však měly negativní vliv na účinník. Přídavné ztráty klesly významně o 40% a také ztráty v železe klesly o 26%. Ještě vyšší účinnosti bylo dosaženo pomocí opatření podle sloupce „k“, kde mnohem vyšší podíl na snížení celkových ztrát mělo snížení ztrát v železe. Přídavné ztráty klesly oproti předchozí variantě pouze o 20%.

Všechny úpravy popsány v kapitole 5 vedou ke zvýšení účinnosti stroje, však v praxi vyžadují zásah do geometrických rozměrů stroje, což by mělo za následek změnu minimálně celé jedné vyráběné řady. Snižující se účinník při rostoucí účinnosti by bylo možné nejjednodušeji vyřešit po domluvě se zákazníkem například připojením kondenzátoru ke svorkovnici a tím jej kompenzovat.

Jako přínos své práce považuji několik návrhů možností snížení přídavných ztrát v asynchronním motoru a tím i zvýšení jeho účinnosti, na základě matematických výpočtů v programu SIMOCALC.

Jako možnost navázání na mou práci bych doporučil hlubší studium problematiky a detailnější popis přídavných ztrát v motoru. Tohle by však vyžadoval spíše několikaletý výzkum, což by bylo nad rámec diplomové práce. Jako další možnost navázání na mou práci bych navrhoval vyrobit několik kusů motorů s provedením úprav dle kapitoly 5 a měřením na zkušebně potvrdit teoretické výpočty.

## Seznam použité literatury

- [1]CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní stroje*. Ostrava, 2001. ISBN 80 – 7078 – 857 - 7. Skripta. VŠB-TUO
- [2]KOCMAN, Karel, Jozef HOLBA, Alexander IHLÁR a Rudolf MRAVENEC. *Elektrické stroje a přístroje I*. 1. vyd. Josef ŘÍHA. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 424 s. ISBN 80-03-00406-3.
- [3]RUSNOK, Stanislav a Pavel SOBOTA. *Cvičení z Elektrických strojů*. Ostrava: Vysoká škola Báňská, 2013. ISBN 978-80-248-3288-3
- [4]KOCMAN, Stanislav. *ASYNCHRONNÍ STROJE* [online]. Ostrava: Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB-TU Ostrava, 2002 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>
- [5]BARTOŠ, Václav et al. *Elektrické stroje*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. 139 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [6]PETROV, G. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [7]MLČÁK, Tomáš. *Elektrotechnika pro FMMI* [online] 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2010 [cit. 2015-03-24]. ISBN 978-80-248-2601-1. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archived/FEI/EFMMI/Elektrotechnika%20pro%20FMMI.pdf>
- [8]BOLDEA, I a S NASAR. *TheInductionMachine Handbook*. BocaRaton: CRC Press, 2002, 950 s. ISBN 08-493-0004-5.
- [9]NADĚŽDA, Pavelková. *Účinnost elektrických motorů a snižování spotřeby elektrické energie* – odborný článek, časopis ELEKTRO 2008/10,
- [10]ONDRŮŠEK, Čestmir. *Elektrické stroje*. VUT, 199?. Skriptum. VUT.
- [11]JIRSÁK, Josef, Rudolf AUTRATA, Karel LIEDERMANN, Zdenka ROZSÍVALOVÁ a Marie SEDLAŘÍKOVÁ. *Materiály a technická dokumentace: Část Materiály v elektrotechnice*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.
- [12]NOVÉ TŘÍDY ÚČINNOSTI MOTORŮ. Siemens [online]. 2010 [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?vw=0&ctxnh=4d43cc42ac&ctxp=home>



- [13]KOPYLOV, P. *Stavba elektrických strojů*. Praha 1: 1988, Nakladatelství technické literatury. ISBN 04-531-88
- [14]POKORNÝ, Karel. *Stavba elektrických strojů II*. první. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury n.p., 1983.
- [15]Heller, B. a V. Hamata: *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. Academia ČSAV, Praha 1961.
- [16]BOLDEA, I. a S. A. NASAR. *The induction machines design handbook*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis, c2010. Electric power engineering series. ISBN 978-1-4200-6668-5.
- [17]PYRHONEN, Juha., Tapani JOKINEN a Valeria. HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Second edition. ISBN 978-1-118-58157-5.
- [18]ČSN EN 60034-2-1 *Točivé elektrické stroje - Část 2-1 : Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [19]IEC 60034-2-1 *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*. Geneva: IEC Central Office, 2014.
- [20]IEEE Std 112: *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators* – New York: American National Standard Institute, 2004
- [21]WENPING, Cao. Comparison of IEEE 112 and New IEC Standard 60034-2-1. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*. 2009, 24(3), 802-808.